



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería Mecánica

# Estudio de viabilidad técnica para aprovisionamiento energético mediante energías renovables de una colonia humana en Marte

---

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor: Sergio Rodríguez Ocaña

Tutor: Jose Luis Pinela Ocaña

Departamento de ingeniería térmica y fluidos

Junio 2014

## TRIBUNAL

Presidente: Cesar Mariano Ruiz Caja

Secretario: María Garrosa Solana

Vocal: Mónica Victoria Rojas Moreno

Suplente: Javier Reboul Corpa

*“Si la especie humana quiere sobrevivir más allá de los próximos cien años, es imperativo que atraviere la negrura del espacio para colonizar nuevos mundos a través del cosmos” (Stephen Hawking, 2014).*

## Resumen

El presente estudio consiste en analizar las posibilidades de establecer una colonia humana en Marte abastecida con energías renovables al nivel de desarrollo tecnológico actual. Este planeta está considerado el más parecido a la Tierra, por lo que siendo el segundo planeta más cercano a ella, resulta un objeto de estudio de gran interés.

Gracias a la información tomada en diferentes misiones realizadas sin tripulación desde el año 1964, se conocen las condiciones presentes en la superficie marciana. Esto ha hecho posible realizar estudios, cada vez más precisos, acerca de establecer una colonia humana. Gracias a estos estudios y siguiendo con el objetivo del proyecto, se ha procedido a estudiar las energías renovables disponibles para satisfacer su demanda energética.

El proyecto define las características de la colonia desde sus dimensiones, pasando por las condiciones que debe cumplir para ser habitable, hasta el consumo energético y los sistemas utilizados para su aprovisionamiento, analizando para ello las ventajas e inconvenientes de las diferentes energías de tipo renovable y tomando las más idóneas.

Finalmente, con un consumo energético determinado en 35,76 kW para lograr el correcto funcionamiento de todos los sistemas, se llega a la conclusión de que con la tecnología actual es posible superar los principales retos del próximo paso en la expansión de los humanos por el universo y establecer una colonia humana permanente en la superficie marciana; aunque el hecho de vivir en Marte da lugar a problemas de salud y por emplear únicamente energías renovables pueden surgir dificultades explicadas a lo largo del estudio y en el capítulo 10 Conclusión.

## Abstract

The present study consists on analyzing the possibilities of establishing a human colony on Mars fueled with renewable energy at current technological development. This planet is considered the most Earth-like, so being the second closest planet to it, it is an object of study of great interest.

Thanks to the information taken in different unmanned missions since 1964, we know the present conditions of the Martian surface, which has made possible carrying on with more precise studies about establishing a human colony. Through these studies and continuing with the project objective, we have proceeded to study the available renewable energy to meet its energy demand.

The project defines the characteristics of the colony from its dimensions, following up with the conditions to be habitable, and finishing with the energy consumption and the systems used for sourcing the colony, analyzing the advantages and disadvantages of the different renewable energy types and choosing the most suitable.

Finally, with a power consumption of 35.76 kW to achieve the proper operation of all systems, we come to the conclusion that with the current technology it is possible to overcome the main challenges of the next step in the human expansion across the universe and establish a permanent human colony on the Martian surface; despite the fact that living on Mars can lead to health problems and the only use of renewable energy can create difficulties explained throughout the study and in Chapter 10 Conclusion.

## Índice

Índice de figuras .....	7
Índice de tablas .....	9
1 Introducción y objetivos.....	11
2 Marte .....	13
2.1 Similitudes con la Tierra.....	13
2.2 Diferencias con la Tierra.....	14
3 Exploración de Marte .....	19
3.1 Misiones no tripuladas .....	19
3.1.1 Años 1960-1969 .....	19
3.1.2 Años 1970-1979 .....	19
3.1.3 Años 1980-1989 .....	21
3.1.4 Años 1990-1999 .....	21
3.1.5 Años 2000-2009 .....	23
3.1.6 Años 2010-Presente .....	25
3.2 Antecedentes de misiones tripuladas .....	29
3.3 Futuras misiones tripuladas .....	34
3.3.1 Mars One .....	35
4 Descripción de la colonia .....	39
4.1 Habitantes .....	39
4.2 Riesgos de salud.....	39
4.2.1 Problemas psicológicos .....	39
4.2.2 Radiación .....	40
4.2.3 Gravedad.....	48
4.2.4 Meteoritos.....	49
4.3 Ubicación .....	49
4.3.1 Según radiación solar y temperatura .....	49
4.3.2 Según abundancia de agua.....	50
4.3.3 Selección de la ubicación de la colonia .....	50
4.4 Diseño .....	52
4.4.1 Líneas generales .....	52
4.4.2 Dimensiones .....	54

4.4.3	Climatización.....	57
4.4.4	Abastecimiento de alimentos, agua y aire respirable .....	61
4.4.5	Estación ambiental.....	66
4.4.6	Comunicaciones .....	66
5	Energía requerida .....	69
5.1	Climatización .....	69
5.2	Abastecimiento de alimentos, agua y aire respirable.....	69
5.3	Iluminación .....	70
5.4	Estación ambiental y comunicaciones .....	70
6	Fuentes de energía renovable .....	72
6.1	Biocombustibles.....	72
6.2	Energía de las olas .....	73
6.3	Energía mareomotriz.....	73
6.4	Energía hidráulica .....	73
6.5	Energía geotérmica .....	74
6.6	Energía mediante suelo piezoeléctrico .....	74
6.7	Energía eólica .....	75
6.7.1	Aerogeneradores convencionales .....	75
6.7.2	Aerogeneradores sin aspas.....	76
6.8	Energía solar .....	84
6.8.1	Energía eléctrica solar térmica .....	84
6.8.2	Energía eléctrica solar fotovoltaica .....	85
7	Acumuladores de energía .....	93
7.1	Baterías eléctricas .....	94
8	Fuentes de energía no renovable .....	98
8.1	Energía nuclear .....	98
9	Líneas futuras de desarrollo .....	100
9.1	Rover de exploración .....	100
9.2	Blindaje frente a la radiación .....	100
9.3	Calefacción mediante captadores solares .....	101
9.4	Aporte de comida con independencia de la Tierra .....	101
9.5	Abastecimiento energético de los sistemas de abastecimiento de agua.....	101
9.6	Energía geotérmica .....	102

9.7	Diseño estructural del aerogenerador sin aspas de 56 m de diámetro. ....	102
10	Conclusión .....	104
11	Bibliografía .....	107
11.1	Bibliografía online .....	108
12	Derechos legales de reproducción de tablas y gráficos .....	115
A.	Anexo de cálculo de transmisión térmica.....	117

## Índice de figuras

Figura 2.1 Duración del día e inclinación del eje de rotación. Fuente: NASA/JPL-Caltech.....	13
Figura 2.2 Representación gráfica del tamaño de la Tierra (izquierda) y Marte (derecha). Fuente: elaboración propia .....	14
Figura 2.3 Duración de un año. Fuente: NASA/JPL-Caltech .....	15
Figura 2.4 Rango de temperaturas. Fuente: NASA/JPL-Caltech .....	16
Figura 2.5 Composición de la atmósfera. Fuente: NASA/JPL-Caltech .....	17
Figura 3.1 Instrumentos del rover Curiosity. Fuente: NASA/JPL-Caltech.....	28
Figura 3.2 Recreación de la colonia del proyecto Mars One. Fuente: Mars One / Bryan Versteeg.....	35
Figura 4.1 Tipos de radiación. Fuente: elaboración propia con datos de United States Environmental Protection Agency.....	40
Figura 4.2 Distribución de la dosis media en función de las fuentes naturales de radiación en la Tierra. Fuente: elaboración propia con datos de Naciones Unidas.....	42
Figura 4.3 Dosis de radiación recibida por diferentes fuentes. Fuente: NASA.....	45
Figura 4.4 Radiación en Marte medida por el instrumento RAD del rover Curiosity. Fuente: NASA .....	46
Figura 4.5 Dosis anual en la Tierra y en Marte según el instrumento RAD del rover Curiosity. Fuente: NASA .....	46
Figura 4.6 Temperatura y viento en invierno (izquierda) y verano (derecha). Fuente: NASA/JPL-Caltech .....	50
Figura 4.7 Mapa de Marte con la ubicación de la colonia y varias misiones. Fuente: NASA/JPL-Caltech .....	51
Figura 4.8 Diseño de la colonia en líneas generales. Fuente: Elaboración propia .....	53
Figura 4.9 Volumen total del módulo por habitante. Fuente: NASA.....	54
Figura 4.10 Dimensiones de la colonia. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 4.11 Distribución de las estancias de la colonia. Fuente: Elaboración propia ....	56
Figura 4.12 Composición de los muros de la colonia. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 4.13 Ficha técnica bombilla LED de Philips. Fuente: Philips.....	58
Figura 4.14 Calefacción mediante colector solar. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 4.15 Interpolación para hallar el rendimiento del captador de tipo tubo de vacío. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 4.16 Esquema de funcionamiento del ECLSS. Fuente: NASA/JPL-Caltech.....	62
Figura 6.1 Aerogenerador piezoeléctrico por vorticidad. Fuente: DEUTECNO S.L.....	76
Figura 6.2 Vórtices de Von Kármán. Fuente: DEUTECNO S.L. ....	76
Figura 6.3 Esquema eléctrico de la generación y consumo de la energía eólica. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 6.4 Dimensiones típicas de aerogeneradores según su potencia. Fuente: GIPE, Paul. Energía eólica práctica .....	84



Figura 6.5 Esquema eléctrico de la generación y consumo de la energía eólica. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 7.1 Ficha técnica de la batería NCR18650A. Fuente: Panasonic.....	96
Figura A.1 Resistencias térmicas. Fuente: Elaboración propia .....	117
Figura A.2 Perfil de temperatura en las paredes. Fuente: Elaboración propia .....	125

## Índice de tablas

Tabla 4.1 Dosis media anual de radiación recibida por fuentes naturales. Fuente: Naciones Unidas .....	42
Tabla 4.2 Efectos de la radiación (en mSv) sobre la salud de las personas. Fuente: Naciones Unidas .....	43
Tabla 4.3 Efectos de la radiación (en rads) sobre la salud de las personas. Fuente: NASA .....	43
Tabla 4.4 Cargas térmicas de la colonia. Fuente: Elaboración propia .....	57
Tabla 4.5 Consumo del ECLSS y sus subsistemas en la misión Mars or Bust. Fuente: Informe Mars or Bust .....	62
Tabla 4.6 Consumo de los diferentes subsistemas del ECLSS de nuestra colonia. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 4.7 Consumo de agua en la colonia. Fuente: ESA .....	64
Tabla 6.1 Viscosidad del dióxido de carbono. Fuente: MIT .....	78
Tabla 6.2 Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica. Fuente: INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor...	82
Tabla 7.1 Estado del arte de diferentes tipos de baterías. Fuente: NASA.....	95
Tabla A.1 Número de Nusselt, Raileigh y Prandtl. Fuente: Elaboración propia.....	122
Tabla A.2 Coeficientes y resistencias de convección. Fuente: Elaboración propia .....	123
Tabla A.3 Cargas térmicas por transmisión. Fuente: Elaboración propia .....	124
Tabla A.4 Cargas térmicas por transmisión. Fuente: Elaboración propia .....	125

# Capítulo 1

---

## Introducción y objetivos

## 1 Introducción y objetivos

Desde antes del inicio de la era espacial, la gente se ha preguntado sobre el "planeta rojo" y soñaba con su exploración, levantando una fascinación especial e incluso con un significado mitológico para los seres humanos. Aunque no es el planeta más cercano a la Tierra, los científicos han considerado que Marte es el planeta más parecido a ella dentro del sistema solar, lo que le convierte en un planeta relativamente cercano y con altas probabilidades de encontrar vida, motivando con ello la exploración y despertando un gran interés.

Este trabajo consiste en realizar un estudio del abastecimiento energético de una colonia humana en Marte, con el objetivo de determinar si podría realizarse únicamente mediante energías renovables con el nivel de desarrollo tecnológico actual. Esta colonia, es el siguiente paso lógico en la expansión de los humanos por el universo, ayudando a comprender mejor la Tierra mediante la compresión de Marte y su evolución, provocando mayor unidad global en la Tierra debido a la cooperación internacional con el objetivo de explorar Marte, derivando de ello un avance en nuestro nivel tecnológico y despertando el interés en las futuras generaciones, y finalmente, con el inconveniente del elevado coste de realizar una colonia en Marte, aunque realmente es razonable si se compara con otros gastos sociales actuales.

Para la realización del proyecto, en primer lugar se han analizado las condiciones presentes en la superficie marciana, conocidas gracias a las exploraciones ya realizadas en Marte, comenzando en el año 1964 la misión Mariner 4, y que continúan en nuestros días proporcionando multitud de conocimientos sobre el planeta y han posibilitado realizar estudios como éste para conseguir la exploración humana del planeta.

Seguidamente, se realiza el diseño general de la colonia para determinar el consumo energético que hay que satisfacer mediante energías renovables si fuera posible. Para determinar este diseño, que incluye desde las dimensiones de la colonia y el abastecimiento de las necesidades básicas hasta los sistemas de comunicación, se han analizado estudios anteriores acerca de misiones tripuladas a Marte; los riesgos existentes en Marte para la salud humana y los factores que determinan la ubicación óptima basada en el menor riesgo posible para los habitantes de la colonia, situándose en las coordenadas 22,48° N 49,97° O.

Posteriormente, una vez determinado el consumo energético de la colonia, se han analizado las posibles fuentes de energía renovable a utilizar en Marte, realizando un prediseño de las que son viables y determinando un sistema de almacenamiento energético que permita el continuo abastecimiento energético de la colonia a pesar de que la producción sea variable.

Finalmente, se han analizado las ventajas y los inconvenientes que supondría utilizar energía no renovable en el caso de no poder abastecer la colonia mediante energías renovables.

# Capítulo 2

---

Marte

## 2 Marte

Marte, también conocido como el Planeta Rojo, es el cuarto planeta del Sistema Solar. Estando relativamente cerca de la Tierra, siendo ésta el tercer planeta más cercano al Sol, comparte ciertas características que le hacen ser un planeta bastante parecido al nuestro en comparación con los demás del sistema solar.

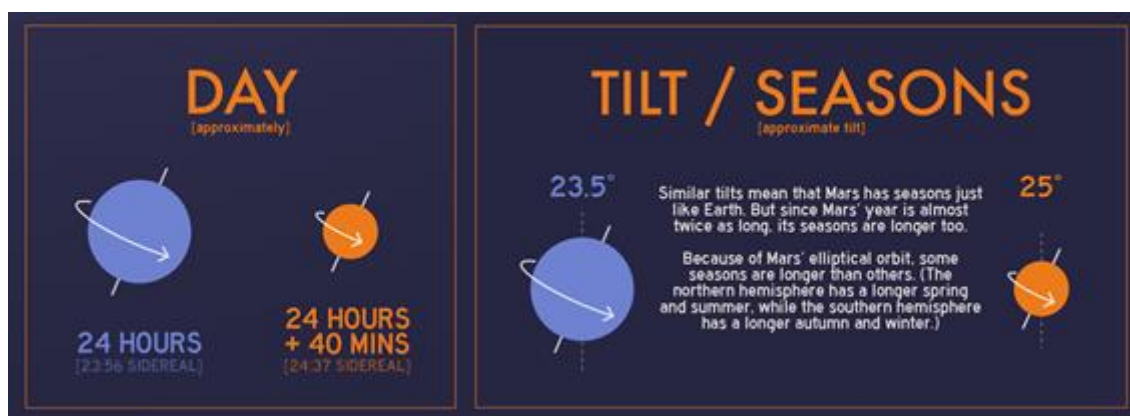
A continuación, se pueden ver las similitudes y las diferencias, muy importantes estas últimas debido a que algunas de ellas imposibilitan la vida de las personas sobre la superficie marciana, obligando a encontrar soluciones para solventar el problema.

### 2.1 Similitudes con la Tierra

Ambos planetas son de tipo rocoso y tienen una superficie pisable similar, ya que Marte tiene aproximadamente la mitad de diámetro que la Tierra pero carece de océanos en su superficie.

Una característica bastante parecida a nuestro planeta, y que facilita la vida de los habitantes de la colonia, es la duración del día. Siendo de 24 horas y 40 minutos frente a las 24 horas terrestres (ver Figura 2.1).

Otra característica muy similar es la inclinación del eje de rotación, siendo de  $25^\circ$  frente a los  $23,5^\circ$  de nuestro planeta (ver Figura 2.1). Esto tiene como resultado que en Marte también tienen lugar las cuatro estaciones del año, aunque de diferente duración a las que actualmente se conocen en la Tierra, como se muestra en el siguiente apartado donde se analizan las diferencias.

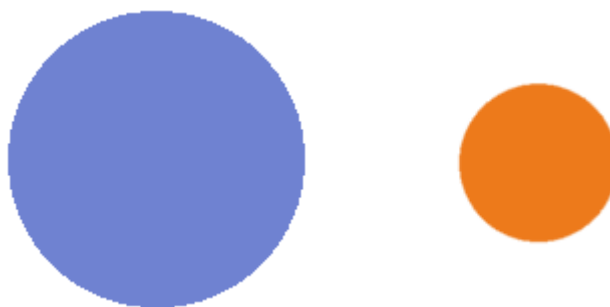


**Figura 2.1** Duración del día e inclinación del eje de rotación. Fuente: NASA/JPL-Caltech

## 2.2 Diferencias con la Tierra

En primer lugar, se aprecia una diferencia de tamaño notable entre ellos (ver Figura 2.2), concretamente, el radio de Marte medido en el ecuador es de 3396,2 km, siendo un 53,2% del radio terrestre. Este radio menor supone que el volumen de Marte sea de  $1,632 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$ , siendo el 15,1% del volumen terrestre.

También la masa de Marte es menor, situándose en  $6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$  supone un 10,7% de la masa terrestre. Con estos datos puede calcularse la densidad marciana y comprobar que también es menor, siendo de aproximadamente  $3933 \text{ kg/m}^3$  frente a los  $5514 \text{ kg/m}^3$  de la Tierra.

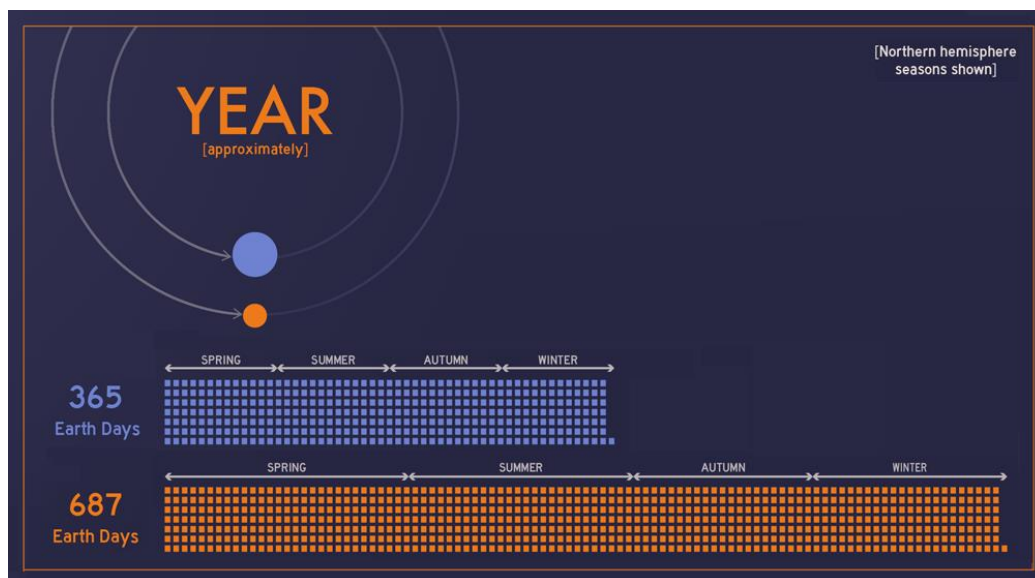


**Figura 2.2** Representación gráfica del tamaño de la Tierra (izquierda) y Marte (derecha). Fuente: elaboración propia

Una característica común con la Tierra es la existencia de satélites naturales, pero se ha incluido dentro del apartado de diferencias porque el planeta Marte tiene dos de ellos. Por tanto, Marte tiene un satélite más que la Tierra pero ambos de menores dimensiones, llamados Fobos y Deimos, de 22 km y 12 km respectivamente, frente a los 1738 km de radio de la Luna.

Respecto a la distancia al Sol, Marte es un planeta que se encuentra a mayor distancia de él. Concretamente, a  $206,62 \cdot 10^6 \text{ km}$  en el perihelio y  $249,23 \cdot 10^6 \text{ km}$  en el afelio, lo que supone respectivamente un 140,5 % y 163,9 % de la distancia entre la Tierra y el Sol durante estos periodos.

Motivado por la mayor distancia al Sol, Marte tarda más tiempo en dar una vuelta completa alrededor del Sol, por ello, la duración del año y de las estaciones marcianas son mayores. Concretamente, la duración anual es de 687 días frente a los 365 de La Tierra (ver Figura 2.3).



**Figura 2.3** Duración de un año. Fuente: NASA/JPL-Caltech

Por otro lado, y también debido a esta mayor distancia respecto al Sol, se reduce la irradiancia solar recibida a  $589,2 \text{ W/m}^2$ , lo que supone un 43,1% de los niveles alcanzados en la Tierra. Esto reduce la energía solar obtenida mediante paneles solares respecto a la que se obtendría en la Tierra, ya que, la cantidad de energía recibida en Marte es significativamente menor. A pesar de ello, en el capítulo 6 Fuentes de energía renovable puede verse que la energía solar es una opción interesante en comparación con las demás energías renovables.

A continuación, se pueden ver las diferencias entre Marte y la Tierra a las que tendremos que buscar solución debido a que imposibilitan la vida de las personas sobre la superficie marciana.

En primer lugar, a pesar de verse reducida la radiación solar incidente debido a la mayor distancia al Sol, la radiación ionizante en la superficie marciana alcanza niveles letales. Esto se debe a que la atmósfera y el campo magnético terrestre hacen de escudo filtrando y desviando este tipo de radiación perjudicial para la salud, mientras que en Marte la atmósfera es mucho menos densa que la terrestre y prácticamente carece de ozono, además, tan solo se han encontrado remanentes de campos magnéticos en algunas regiones.

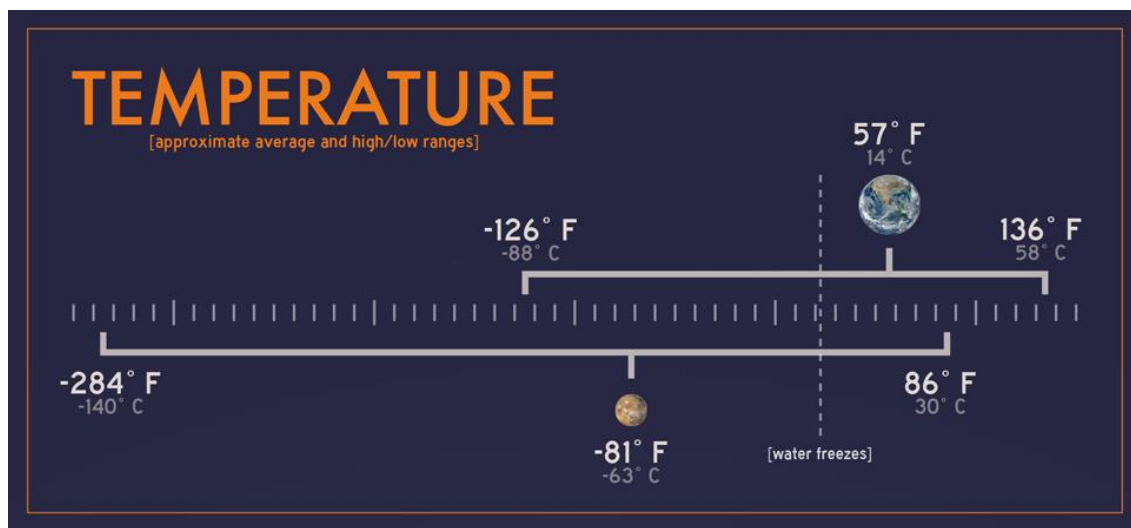
Otra diferencia, muy apreciable para los habitantes de la colonia, es la menor aceleración de la gravedad, siendo de  $3,71 \text{ m/s}^2$ , un 37,9 % de la terrestre. En principio no parece que esto sea un problema, pero causa dificultades que ponen en riesgo la vida en Marte, generando problemas óseos y musculares que pueden verse en el apartado 4.2 Riesgos de salud.

Por otro lado, en la superficie de Marte tienen lugar unas temperaturas más bajas que en la Tierra (ver Figura 2.4). En la ubicación de la colonia (ver apartado 4.3), el mismo lugar donde aterrizó la sonda Viking 1, se ha medido la temperatura tomando



una media de  $-63^{\circ}\text{C}$  frente a los  $14^{\circ}\text{C}$  terrestres. Además de esta temperatura media, se determinó una temperatura máxima de  $-31^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $-89^{\circ}\text{C}$ .

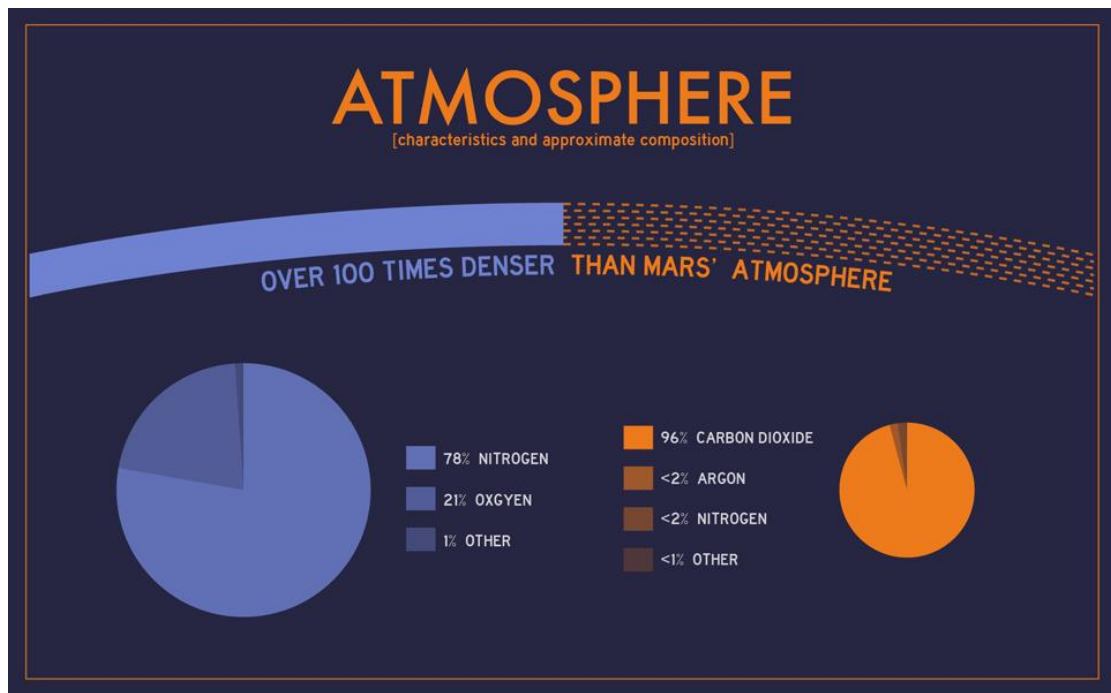
Esta baja temperatura imposibilita la vida de las personas en Marte pero no ocasiona grandes problemas porque puede solventarse añadiendo un sistema de climatización a la colonia, como puede verse en el apartado 4.4 Diseño.



**Figura 2.4** Rango de temperaturas. Fuente: NASA/JPL-Caltech

Finalmente, la última pero no menos importante diferencia respecto a la Tierra es su atmósfera, resultando imposible la vida de las personas no solo por la temperatura, sino también por su composición y su baja presión.

En la ubicación de la colonia, se ha medido la presión atmosférica obteniendo valores entre 6,9 mbar y 9 mbar, frente a la presión atmosférica normalizada en la Tierra de 1 atmósfera, equivalente a 1013,25 mbar, considerando como muy baja la presión de Marte (menos del 1% de la terrestre). Por otro lado, se determinó una densidad de  $0,020\text{ kg/m}^3$  a nivel superficial y una velocidad del viento de 2 a 7 m/s en verano, de 5 a 10 m/s en otoño, y de 17 a 30 m/s durante las tormentas de arena. Finalmente, la composición química impide obtener el oxígeno necesario para sobrevivir, ya que ésta es muy diferente a la que encontramos en la Tierra (ver Figura 2.5). Concretamente, expresado en tanto por ciento en volumen se compone de un 95,32% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 2,7 % de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), 1,6 % de argón (Ar), 0,13 % de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y 0,08 % de monóxido de carbono (CO); encontrando también vapor de agua en menores cantidades, concretamente  $2 \cdot 10^{-6}\text{ kg/m}^3$ .



**Figura 2.5** Composición de la atmósfera. Fuente: NASA/JPL-Caltech

Otra diferencia entre Marte y la Tierra, es que en la atmósfera marciana tienen lugar tormentas de arena debido al viento que levanta el polvo rojo que cubre la superficie de Marte. Esta situación no se da en la Tierra gracias a la vegetación, sin embargo, la vegetación es inexistente en Marte, dando al planeta un aspecto de desierto mundial y tormentas de arena que pueden durar meses, como pudo comprobarse en la misión Mariner 9 de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) realizada en 1971, donde se divisó una de las mayores tormentas de arena observadas en Marte, (empezando el 22 de septiembre de 1971 y amainando en diciembre de 1971) alcanzando los tres meses terrestres de duración.

# Capítulo 3

---

## Exploración de Marte

### 3 Exploración de Marte

En este capítulo se analizan las diferentes misiones que tienen como objetivo explorar Marte. En primer lugar, se analizan las misiones no tripuladas, debido a que hasta el momento no ha habido ninguna misión tripulada a Marte. A pesar de ello, seguidamente se analizan los estudios de las misiones tripuladas que no han sido realizadas pero sí tenían esta intención. Finalmente, se analiza el proyecto de misión tripulada llamado Mars One, que tiene el objetivo de establecer una colonia humana en Marte y es el proyecto que hasta ahora tiene más posibilidades de ser el primero que lleve al hombre a Marte.

#### 3.1 Misiones no tripuladas

A continuación, se muestran las misiones no tripuladas realizadas con éxito en Marte, comentando sus diferentes propósitos y analizando la información aportada que puede ser útil para el estudio de establecer una colonia humana en el planeta.

##### 3.1.1 Años 1960-1969

- Mariner 4 - NASA Mars flyby (1964)

Mariner 4 es la primera misión realizada con éxito en Marte, llevada a cabo por la NASA, se trató de un vuelo cercano donde se consiguieron las primeras imágenes de la superficie marciana.

- Mariner 6 y Mariner 7 - NASA Mars flyby (1969)

Se trata de dos misiones de la NASA en las que se sobrevoló el planeta cerca de la superficie marciana estableciendo la base para futuras investigaciones, estudiando la superficie y la atmósfera, probando las tecnologías de la época y buscando vida extraterrestre.

##### 3.1.2 Años 1970-1979

- Mars 2 y Mars 3 - Soviet Mars orbiter and lander (1971)

Se trata de dos misiones soviéticas con el objetivo de tomar imágenes; medir propiedades de la atmósfera; analizar la topografía, composición y propiedades físicas de la superficie; y monitorizar el viento solar y los campos magnéticos.

En estas misiones se revelaron datos importantes desconocidos hasta el momento, como montañas de hasta 22 km de altura, temperaturas entre -110 °C y 13 °C en la superficie, presiones atmosféricas entre 5,5 y 6 mbar, concentración de vapor de agua 5000 veces menor que en la Tierra, granos de arena hasta a 7 km de altura en la atmósfera provenientes de tormentas de arena, mapas de relieve e información sobre la gravedad marciana y remanentes de campos magnéticos.

- Mariner 9 - NASA Mars orbiter (1971)

Los objetivos de la misión, se centraban en estudiar los cambios que tienen lugar en la atmósfera y superficie de Marte. De esta misión se obtienen datos interesantes para el estudio de una colonia humana, ya que tuvo lugar una de las mayores tormentas de arena observadas en Marte, lo que afecta directamente en la generación de energía mediante paneles solares. Esta tormenta obligó a retrasar el inicio de la misión porque solamente se veía la cima del monte Olimpo y de los volcanes de Tharsis desde el 22 de septiembre de 1971 hasta diciembre de ese mismo año, lo que indica que las largas tormentas de arena pueden alcanzar hasta los tres meses terrestres de duración.

- Mars 5 - Soviet Mars orbiter (1973)

La misión Mars 5 consistió en un orbitador con el objetivo de recoger información sobre la composición, estructura y propiedades de la atmósfera y de la superficie de Marte.

- Mars 6 - Soviet Mars lander (1973)

En la siguiente misión soviética, conocida como Mars 6, se fue un paso más allá para realizar estudios in situ de la atmósfera y superficie de Marte, siendo la primera misión donde se añade un módulo de aterrizaje.

- Viking - NASA orbiters/landers to Mars (1975)

La misión Viking de la NASA se compone de dos naves diferentes llamadas Viking 1 y Viking 2, formadas por un orbitador y un módulo de aterrizaje cada una de ellas. Los objetivos de esta misión se centraron en buscar evidencias de vida, tomar imágenes de alta resolución de la superficie marciana, y por último, determinar la composición de la atmósfera y de la superficie de Marte.

Llegando a Marte en Junio de 1976, la información tomada por Viking 1 es muy útil para realizar el estudio de establecer una colonia humana debido a obtener multitud de datos en una zona favorable para establecer la colonia. Por un lado, por las condiciones climáticas favorables, y por otro lado por ser una zona adecuada para realizar el aterrizaje, ya que se buscó desde la órbita marciana un lugar apto durante un mes, aterrizando finalmente en la región llamada Chryse Planitia, concretamente en las coordenadas 22,48° N 49,97° O, 1,5 km por debajo del nivel medio de elevación de referencia.

Por otro lado, Viking 2 realizó la entrada en la órbita marciana en agosto de 1976 y el módulo de aterrizaje tomó tierra en septiembre de 1976 en la región Utopia Planitia, concretamente en las coordenadas 47,97° N 225,74° O.

Finalmente, esta misión fue un éxito con Viking 1 y Viking 2, tanto para los módulos de aterrizaje como para los orbitadores, proporcionando la visión más completa de Marte hasta la fecha, tomando multitud de imágenes y datos acerca de la superficie y atmósfera, revelando accidente geográficos, evidencias de agua, diferentes datos meteorológicos como las temperaturas y velocidad del viento, información sobre

los ciclos de las tormentas de polvo, ningún indicio de vida y la composición de la superficie formada por arcilla rica en hierro en ambos lugares de aterrizaje.

Finalmente, se ha decidido tomar gran cantidad de datos medidos durante el transcurso de esta misión para realizar el proyecto de la colonia humana, esto se debe a que Viking 1 aterrizó en un lugar favorable para establecer la colonia, como se analiza en el apartado 4.3 Ubicación, siendo ésta la principal fuente de datos proporcionados por la NASA para realizar el estudio.

### **3.1.3 Años 1980-1989**

- **Phobos - Soviet missions to Mars (1988)**

Se trata de una misión soviética con el objetivo de estudiar la composición de la superficie del satélite marciano Fobos; realizar observaciones del Sol; estudiar el espacio interplanetario; y finalmente, estudiar la superficie, la atmósfera y caracterizar el plasma de las cercanías de Marte.

La misión fue realizada con Phobos 1 y Phobos 2, perdiendo el contacto con la primera antes de lo previsto y con la segunda poco antes de la fase final de la misión, donde estaba previsto acercarse a menos de 50 metros de la superficie de Fobos y liberar dos módulos de aterrizaje.

### **3.1.4 Años 1990-1999**

- **Mars Observer - NASA attempted mission to Mars (1992)**

Mars Observer fue la primera de una serie de misiones planetarias llevadas a cabo por la NASA en 1992. Fue diseñada para estudiar la geología y el clima marciano, fijando los objetivos en determinar la composición y la mineralogía de la superficie, definir la topografía y el campo gravitacional, determinar la naturaleza del campo magnético marciano, estudiar los compuestos volátiles presentes, analizar el polvo durante un ciclo estacional, y finalmente, explorar la estructura de la atmósfera y sus corrientes.

Siendo de gran utilidad para nuestro proyecto varios datos analizados durante esta misión, especialmente para conocer los ciclos estacionales de las tormentas de polvo. Desgraciadamente se perdió el contacto en agosto de 1993, tres días antes de la inserción en órbita programada. Por motivos aún desconocidos, no se ha podido establecer contacto y se piensa que el fallo inicial pudo estar en la rotura de una tubería de combustible, pudiendo quedar en la órbita marciana o en una heliocéntrica.

- **Mars 96 - Russian attempted mission to Mars (1996)**

La misión rusa Mars 96, podría haber proporcionado gran cantidad de información debido a que estaba formada por un orbitador, dos estaciones autónomas y dos penetradores de la superficie marciana que podrían haber relevado datos de interés de cara a realizar un estudio para implantar energía geotérmica a nuestra colonia. Pero finalmente, la nave espacial acabó cayendo en la Tierra por razones desconocidas tras su puesta en la órbita terrestre para después iniciar la trayectoria a Marte.

- Mars Pathfinder - NASA lander and rover to Mars (1996)

Mars Pathfinder, conocida anteriormente como Mars Environmental Survey Pathfinder o MESUR, fue la segunda misión planetaria denominada por la NASA de bajo coste, teniendo como principal objetivo demostrar la viabilidad de los aterrizajes de bajo coste y explorar la superficie marciana.

Aterrizó en julio de 1997 en la región denominada Ares Vallis, concretamente en las coordenadas 19,33 N 33,55 W, abriendo después de esto sus tres paneles solares triangulares que le dan una apariencia de pétalos. Sin obtener información técnica sobre estos paneles, durante la misión se tomaron imágenes y datos hasta septiembre de 1997, cuando por razones desconocidas se perdió la comunicación.

- Mars Global Surveyor - NASA Mars orbiter (1996)

En esta misión, estaba previsto orbitar alrededor de Marte durante un año marciano, equivalente a 687 días terrestres, pero finalmente se realizaron prorrogas hasta alcanzar una duración de siete años terrestres. Durante la misión se han recogido multitud de datos, permitiendo estudiar procesos en la superficie y recopilar información sobre la topografía, la composición de la superficie, la gravedad marciana y la evolución de campos magnéticos y el clima.

De ella se puede obtener información útil para el estudio de la colonia, como la mínima velocidad de descarga de datos durante las comunicaciones de 21,33 kbps y que tiene un sistema de abastecimiento energético formado por una batería de tipo níquel-hidrógeno de 28 V alimentada por cuatro paneles solares, dos de tipo GaAs y dos de silicio, los cuales proporcionan 980 W con una superficie de 26,6 m<sup>2</sup>.

- Nozomi (Planet-B) - ISAS (Japan) orbiter to Mars (1998)

Se trata de una misión japonesa con el objetivo de orbitar alrededor de Marte para estudiar la atmósfera, su interacción con el viento solar y desarrollar tecnología para futuras misiones. Pero finalmente se abandonaron los esfuerzos por poner Nozomi en la órbita después de un fallo en una válvula que derivó en pérdidas de combustible que imposibilitó seguir con los planes establecidos en la misión.

- Mars Climate Orbiter - NASA attempted orbiter to Mars (1998)

Mars Climate Orbiter (anteriormente conocido como Mars Surveyor '98 Orbiter) formó parte del programa Mars Surveyor '98 junto a Mars Polar Lander (anteriormente llamado Mars Surveyor '98 Lander). El objetivo de este programa fue estudiar el clima, el agua y el dióxido de carbono de Marte con el fin de entender el comportamiento y las reservas de éstos; analizar el papel que juegan los compuestos volátiles en la atmósfera; y finalmente, buscar evidencias de cambios climáticos en Marte a largo plazo.

Desgraciadamente, debido a un error en la navegación derivado de introducir la altura de la órbita de 57 kilómetros pensando que se introducían 57 millas, Mars



Climate Orbiter quedó destruido con la fricción de la atmósfera a 57 km de altura en lugar de los 140-150 km para los que se había diseñado.

A pesar de ello, puede saberse que tenía tres paneles solares de tipo GaAs/Ge que proporcionaban 1000 W de potencia en la Tierra y 500 W en Marte. Aunque debido a orbitar y no estar en la superficie, no podremos tomar como referencia que en Marte se genere la mitad de energía que en la Tierra porque en este caso no se cuenta con la influencia de la atmósfera.

- Deep Space 2 - NASA attempted penetrator mission to Mars (1999)

La misión Deep Space 2 (DS2), también llamada Mars Microprobe Project, consistió en enviar dos sondas al polo sur marciano y tomar datos de las propiedades del subsuelo. Los datos que se pretendían obtener en esta misión serían muy útiles para estudiar el uso de energía geotérmica en Marte pero no pueden tomarse como fiables por el inconveniente de realizar esta misión en una zona muy diferente a la que elegiremos para la colonia. Esto se debe a que objetivo de esta misión no era realizar un estudio geotérmico sino estudiar el subsuelo para probar la presencia de hielo bajo la superficie y determinar las propiedades y el gradiente de temperaturas del material subsuperficial. Por lo que el aterrizaje estaba previsto en esta zona debido a considerar el polo sur como un área con importantes reservas de agua, dióxido de carbono y compuestos volátiles. Finalmente las mediciones previstas no se recibieron, sin conocerse aún el motivo de este fallo, resultando ser una misión fallida.

- Mars Polar Lander - NASA attempted lander to Mars (1999)

En esta misión, Mars Polar Lander (anteriormente Mars Surveyor '98 Lander) se lanzó independientemente del Mars Climate Orbiter (anteriormente Mars Surveyor '98 Orbiter) formando parte del programa Mars Surveyor '98 comentado anteriormente.

Finalmente, se perdió la comunicación poco antes de producirse la entrada en la atmósfera marciana en diciembre de 1999, lo que unido a que estaba previsto que Mars Polar Lander aterrizase cerca del polo sur marciano, lejos de las zonas óptimas para establecer la colonia, hace que no se hayan podido tomar datos útiles para el estudio de la colonia. A pesar de ello, se han podido obtener datos útiles como un consumo energético de 25W y el tipo de paneles solares utilizados, siendo de arseniuro de galio.

### **3.1.5 Años 2000-2009**

- 2001 Mars Odyssey - NASA Orbiter Mission to Mars (2001)

Mars Odyssey forma parte del proyecto Mars Surveyor 2001, que en un principio constaba de dos misiones lanzadas por separado, Mars Surveyor 2001 Orbiter y el Mars Surveyor 2001 Lander, pero finalmente se canceló el programa Lander y se nombró 2001 Mars Odyssey al conocido anteriormente como Orbiter.

El objetivo de esta misión era permanecer en órbita alrededor de Marte durante tres años, realizando un análisis mineralógico de la superficie del planeta y una medición de la radiación ambiental. Con ello, se busca recopilar datos para determinar si el ambiente de Marte fue alguna vez propicio para la vida, caracterizar el clima y la



geología de Marte, y finalmente, estudiar posibles riesgos de radiación para astronautas en futuras misiones mediante el aparato MARIE (Mars Radiation Environment Experiment). El aparato MARIE, capaz de medir la radiación, fue puesto en hibernación durante el viaje por un problema, consiguiendo encender de nuevo el aparato en Marzo de 2002.

Un dato útil en lo referido a las comunicaciones, es que este orbitador también se utilizó como repetidor en futuras misiones a Marte durante un período de cinco años, dando pie a estudiar la idea de mandar un orbitador que haga labores de repetidor con el fin de tener una buena comunicación con la Tierra.

Además, otros datos útiles para el estudio de una colonia humana, son las células fotovoltaicas son de arseniuro de galio; el aparato MARIE, que mide la radiación que pone en riesgo a los exploradores humanos; y finalmente, la composición del suelo marciano con el fin de instalar energía de tipo geotérmico y obtener el agua contenida en el suelo. A pesar de no realizar ninguna excavación, se realizaron medidas de la composición con Thermal Emission Imaging System (THEMIS) y Gamma-Ray Spectrometer (GRS).

- Mars Express - ESA Mars Orbiter and Lander (2003)

Mars Express es una misión llevada a cabo por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), que consistió en un orbitador llamado Mars Express Orbiter y un módulo de aterrizaje llamado Beagle 2.

Los objetivos del Mars Express Orbiter fueran obtener imágenes en alta resolución, estudiar la estructura del subsuelo, establecer un mapa mineralógico y determinar la composición de la atmósfera y su circulación global incluyendo la interacción con la superficie. Por otro lado, los objetivos de The Beagle 2 fueron caracterizar la geología, mineralogía y las propiedades atmosféricas en el lugar de aterrizaje; buscar posibles señales de vida; y tomar datos sobre la meteorología y el clima.

Finalmente, Mars Express llegó a Marte en diciembre de 2003 y la duración de la misión planeada para ser 1 año marciano (687 días terrestres) se prorrogó en tres ocasiones para el Mars Express Orbiter, mientras que, el módulo de aterrizaje Beagle 2 entró en la atmósfera marciana el 25 de diciembre y después no se ha recibido ninguna señal, declarándolo como perdido.

- Mars Exploration Rovers. Spirit & Opportunity - Two NASA Rovers to Mars (2003)

Se trata de dos rover lanzados en 2003 con el fin de explorar el planeta, ambos capaces de recorrer 100 metros por día y superando el objetivo inicial fijado en permanecer en funcionamiento 90 días.

Su objetivo se basó en investigar si alguna vez surgió la vida en Marte, buscar indicios geológicos de las condiciones ambientales que existían cuando el agua líquida estaba presente, evaluar si estos ambientes eran propicios para la vida, y por último, caracterizar el clima y la geología para preparar la exploración humana del planeta.

Para ello, estaban provistos de diferentes equipos de toma de datos y de paneles solares capaces de proporcionar 140 W de potencia en condiciones de máxima radiación solar, almacenando la energía en baterías recargables. Concretamente, el Opportunity tenía paneles solares capaces de generar 140 W de potencia máxima cuando estaban nuevos y limpios, generando aproximadamente 900 w·h de energía cada día marciano con una superficie de 1,3 m<sup>2</sup>.

- Mars Reconnaissance Orbiter - NASA Orbiter (2005)

Durante esta misión, el Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) orbitó alrededor de Marte con el objetivo de tomar imágenes en alta resolución, tomar datos con el objetivo de caracterizar el clima de Marte, determinar la naturaleza del terreno, identificar accidentes geográficos que pudieran estar relacionados con el agua, y por último, determinar lugares donde poder tomar muestras en futuras misiones a Marte.

- Phoenix - NASA Mars Scout Lander (2007)

Durante la misión Phoenix, se estudió el clima, la superficie y el entorno cercano a la superficie en su lugar de aterrizaje en las regiones del norte de Marte. Debido a los inconvenientes de establecer una colonia en regiones polares, analizados en el apartado 4.3 Ubicación, esta misión no aporta nada nuevo para establecer una colonia humana.

### 3.1.6 Años 2010-Presente

- Phobos-Grunt - Attempted Russian Phobos Sample Return (2011)

El objetivo de esta misión era traer una muestra del satélite marciano Fobos, pero debido a un problema en el lanzamiento, que se realizó en común con la siguiente misión comentada (Yinghuo-1), no pudo dejar la órbita terrestre y se suspendió el lanzamiento programado, haciendo la reentrada a la atmósfera terrestre el 15 de enero de 2012.

- Yinghuo-1 - Attempted Chinese Mars Orbiter (2011)

Teniendo planificado realizar el viaje junto a la misión Phobos-Grunt, no se pudo realizar esta misión por los mismos motivos, haciendo la reentrada a la atmósfera terrestre en enero de 2012.

A pesar de no poder realizar el viaje a Marte, es interesante para la comunicación entre Marte y la Tierra, saber que con tecnologías actuales se pretendía alcanzar una velocidad de transmisión de datos de hasta 16 Kb/s.

- NASA Mars Science Laboratory - NASA Mars Rover (2011)

Mars Science Laboratory (MSL), más conocido como Curiosity, es un rover de exploración lanzado el 26 de noviembre de 2011 y que llegó a Marte en agosto de 2012 para realizar la misión más ambiciosa hasta la fecha, formando parte de la última misión

realizada a Marte. Su objetivo es explorar el hábitat marciano para ver si hay o hubo vida en algún momento en Marte, tomando para ello multitud de parámetros útiles para el estudio de establecer una colonia humana, tratándose de datos recientes y precisos medidos sobre la superficie marciana.

Durante el transcurso de esta misión, está previsto pasar, al menos, un año marciano (687 días terrestres) en la superficie, con ocho objetivos diferenciados en:

- Determinar la naturaleza y medir los compuestos orgánicos de carbono.
- Medir los componentes químicos que posibilitan la creación de vida.
- Buscar indicios de procesos biológicos.
- Determinar la composición de los materiales geológicos cercanos a la superficie y en la superficie marciana.
- Entender los procesos que han formado y modificado las rocas y el suelo.
- Evaluar a largo plazo los procesos de evolución en la atmósfera.
- Determinar el estado actual del ciclo de agua y dióxido de carbono.
- Caracterizar el amplio espectro de radiación en la superficie marciana, incluyendo la radiación cósmica, la actividad de protones solares y neutrones secundarios.

Para lograr estos objetivos, está dotado con multitud de equipamiento, como instrumentos de medida, cámaras, equipo informático y un generador termoelectrónico alimentado por radioisótopos que proporciona una potencia de 125 W al inicio de la misión, tratándose de un dato útil para suponer el consumo de la estación ambiental y de control que tendrá nuestra colonia.

Los instrumentos de toma de datos instalados en el Curiosity (ver Figura 3.1) son los siguientes:

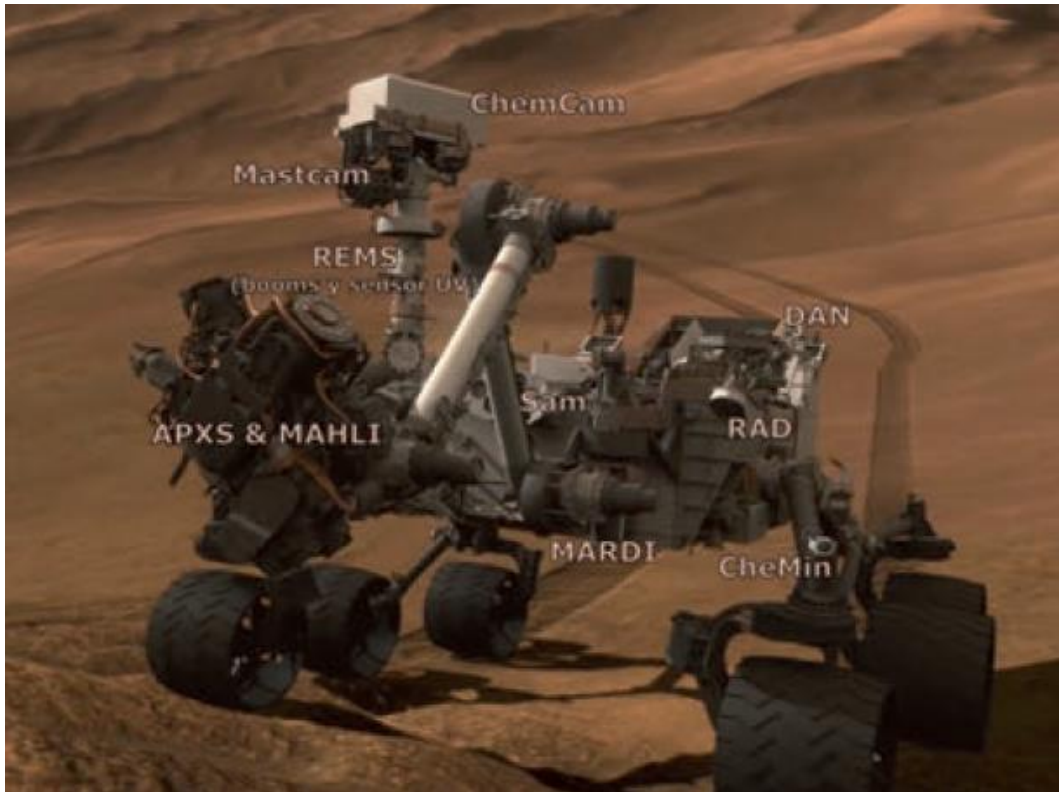
- MARs Descent Imager (MARDI), toma imágenes en alta resolución durante el descenso y aterrizaje en la superficie marciana.
- Mast Camera (MastCam), está formado por un conjunto de cámaras capaz de grabar vídeo de alta definición y tomar imágenes multispectral y estereoscópicas.
- MARs Hand Lens Imager (MAHLI), se trata de un microscopio capaz de tomar y enviar imágenes.
- Sample Analysis at Mars (SAM), capaz de realizar análisis orgánicos y químicos elementales, analizando también isótopos orgánicos estables y gases nobles.
- Alpha Particle X-Ray Spectrometer (APXS), capaz de determinar la composición de las rocas y el suelo.
- Chemistry & Camera (ChemCam), consiste en un espectrómetro que analiza las rocas marcianas.
- Chemistry & Mineralogy X-Ray Diffraction/X-Ray Fluorescence Instrument (CheMin), estudia los minerales de las rocas mediante rayos X.
- Radiation Assessment Detector (RAD), capaz de medir un amplio rango de radiaciones, muy útil para la posible exploración humana del planeta.
- Dynamic Albedo of Neutrons experiment (DAN), detecta neutrones y átomos de hidrógeno en el subsuelo, permitiendo determinar la cantidad de agua de manera indirecta.

- Mars Science Laboratory Entry Descent and Landing Instrument (MEDLI), se trata de un instrumento capaz de tomar datos durante la entrada a la atmósfera marciana, permitiendo mejorar los sistemas de entrada a la atmósfera en futuras misiones.
- Rover Environmental Monitoring Station (REMS), se trata de una estación ambiental que estudia las condiciones ambientales actuales y la que existieron hace millones de años en la zona de aterrizaje del rover. Su construcción ha sido realizada en España, liderada por el Centro de Astrobiología y en colaboración con la empresa Crisa (la cual forma parte de AIRBUS Group), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), varias instituciones norteamericanas y el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI).

La estación ambiental REMS se compone de seis sensores que aportan la siguiente información:

- Humedad
- Temperatura atmosférica
- Temperatura del suelo
- Dirección y velocidad del viento
- Presión atmosférica
- Radiación ultravioleta

Puede destacarse que el sensor de radiación ultravioleta que incluye el instrumento REMS, posee unos imanes de forma toroidal que mitigan la deposición de polvo marciano sobre la óptica de los fotodiodos, esto es posible debido a que el polvo marciano se carga electrostáticamente tras la fricción que tiene lugar mientras se desplaza por la atmósfera, siendo una posible solución al problema de deposición de polvo en las placas solares (ver apartado 6.8 Energía solar).



**Figura 3.1** Instrumentos del rover Curiosity. Fuente: NASA/JPL-Caltech

A pesar de tratarse de una misión muy reciente, se conocen datos tomados por el rover Curiosity gracias a que seis meses después del aterrizaje y tras haber profundizado en el análisis de los datos tomados, se hicieron públicos los datos al resto de la comunidad científica no participante en la misión, proporcionando el resto de los datos en sucesivos intervalos de tres meses. Estos datos se han hecho públicos a través del sistema web denominado PDS (Planetary Data System), donde están todos los datos de todos los instrumentos registrados por las misiones de NASA.

Uno de estos datos de gran utilidad para nuestra colonia humana es el seguimiento de los niveles de radiación ionizante realizado por el rover, ya que ayudan a diseñar con mayor precisión el necesario blindaje frente a la radiación.

Finalmente, debido a que el aterrizaje del rover Curiosity se situó en el cráter Gale por sus posibilidades de haber albergado vida en el pasado y no por las buenas condiciones para establecer una colonia en Marte, se establece la ubicación en un lugar diferente y más favorable para establecer una colonia humana, coincidiendo con el lugar de aterrizaje de la sonda Viking 1 (ver Apartado 4.3 Ubicación). Por ello, para obtener mayor fiabilidad de los datos, se toman todos los datos posibles proporcionados por el módulo de aterrizaje Viking 1, haciendo uso únicamente de las mediaciones de radiación realizadas por el instrumento RAD del rover Curiosity, ya que la sonda Viking 1 no tomó este tipo de datos.

- Mangalyaan - ISRO (India) Mars Orbiter (2013)

Esta misión, con la llegada prevista para el 24 de septiembre de 2014, está diseñada para estudiar el planeta desde su órbita, pasando entre 6 y 10 meses orbitando con el objetivo de explorar las características de su superficie, morfología, mineralogía y su atmósfera.

Pese a no haber llegado a Marte todavía, resulta interesante para la generación y almacenamiento de energía, ya que, se trata de un sistema realizado con tecnología actual formado por 2,52 m<sup>2</sup> de superficie ocupada con paneles solares capaces de generar 800 W de potencia en Marte, cargando con ello una batería de iones de litio de 36 amperios hora.

- MAVEN - NASA Mars Orbiter (2013)

Finalmente, Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN), es la misión más reciente que tiene Marte como objetivo. Lanzada con éxito el pasado 18 de noviembre de 2013, los objetivos de esta misión son proporcionar información sobre la atmósfera superior marciana, la ionosfera, las interacciones de éstas con el viento solar y determinar la pérdida de compuestos volátiles al espacio en función del tiempo.

### 3.2 Antecedentes de misiones tripuladas

A pesar de no ser el planeta más cercano a la Tierra, parece ser el siguiente paso lógico a la Luna en cuanto a exploración humana, ya que, es el más parecido a ella en el sistema solar y está relativamente cerca. En 1964, empezaron a tener lugar las exploraciones exitosas al planeta mediante robots, pero antes de ello, Von Braun ya había pensado en realizar una misión tripulada a Marte, siendo el primer estudio de este tipo. Otra muestra del interés por realizar misiones tripuladas, es que pueden encontrarse más de mil estudios piloto con este objetivo entre los años 1950 y 2000, tanto dentro como fuera de la NASA. Debido a esta gran cantidad de estudios realizados, en este apartado se pueden ver los proyectos más importantes y novedosos, en los que hay ideas interesantes para el estudio de establecer una colonia humana en Marte.

- Misión “a gran escala”

La misión “a gran escala”, descrita por Von Braun cuando empezó a escribir una novela sobre este tema en el año 1947, es el primer estudio importante acerca de una misión tripulada a Marte. Por este motivo, se cometen multitud de errores que podrían costar la vida a todos los tripulantes de la misión debido al desconocimiento de la época, donde todavía no se habían realizado exploraciones del planeta mediante rovers de exploración.



La misión consistía en ensamblar 10 naves de 4000 toneladas en la órbita terrestre, ya que, se pensaba reducir los riesgos de posibles averías con un número elevado de naves que permitiesen la redistribución de la tripulación. Seguidamente, 70 personas realizarían el viaje hasta entrar en una órbita marciana, una vez allí, parte de la tripulación se quedaría orbitando en las naves a la espera de que sus compañeros explorasen la superficie durante 400 días, uniéndose finalmente a ellos para realizar el viaje de vuelta a la Tierra.

En esta misión se utilizan estructuras inflables para alojar a los tripulantes durante la estancia en Marte, siendo ésta la misma idea que puede encontrarse en proyectos actuales como Mars One, comentado detalladamente en el apartado Mars One. Con este tipo de estructura, se busca reducir el peso y el espacio ocupado durante el transporte hacia Marte, siendo una idea a tener en cuenta en nuestro estudio pero descartada por motivos detallados en el apartado 4.4 Diseño, como por ejemplo el aislamiento térmico y la robustez de la estructura.

Respecto a la ubicación, debido a las condiciones climáticas se estableció cercana al ecuador, pero en aquel momento, pensaron que para realizar un aterrizaje suave debería ser en zonas polares y después recorrer más de 6400 km por la superficie marciana hasta llegar a la zona ecuatorial. Para determinar la ubicación de la colonia humana, como se comenta detalladamente en el apartado 4.3 Ubicación, se elige una zona ecuatorial porque el clima es más suave y la radiación solar incide más perpendicular, obteniendo mayor rendimiento de los paneles solares. Gracias a la misión Viking, se sabe que es posible realizar un aterrizaje sin problemas en la zona que lo hizo el módulo de aterrizaje Viking 1, después de pasar un mes orbitando y buscando un lugar seguro.

Un dato destacable de esta misión, es que no se tomó ninguna medida contra la radiación, ya que se creía que a mediados del siglo XXI existiría un fármaco que permitiese la exposición sin problemas durante grandes periodos de tiempo. Desgraciadamente, no ha sido así y en este trabajo se realiza el estudio con los conocimientos y tecnologías actuales, lo que obliga a instalar un blindaje contra la radiación como puede verse en el apartado 4.2.2 Radiación.

Una preocupación de Von Braun, que se ha tenido en cuenta en el apartado 4.2 Riesgos de salud, es el hecho de permanecer durante largos periodos de tiempo encerrados en un habitáculo reducido, lo que podría derivar en depresiones o afectar al comportamiento de los tripulantes y producir problemas psicológicos que podrían derivar incluso en asesinatos.

#### ▪ Primer estudio de la NASA

En noviembre de 1957, comenzó la investigación sobre el uso de propulsión termonuclear y eléctrica para cohetes por parte del Centro de Investigación Lewis, un laboratorio de la NACA (National Advisory Committee on Aeronautics).

Posteriormente, en 1958, el presidente de los Estados Unidos creó la NASA a partir de la unión de la NACA con varios departamentos de defensa. Por ello, se puede hablar de este estudio como el primer estudio de la NASA con el fin de realizar una misión tripulada a Marte.

Este estudio, tenía el objetivo de investigar sistemas de propulsión para vuelos interplanetarios, pero además, los planes contemplaban una tripulación de siete personas, de las cuales dos de ellas permanecerían durante 40 días sobre la superficie marciana. El uso de propulsión termonuclear y eléctrica, permite realizar vuelos interplanetarios con menor peso de combustible que los cohetes químicos, posibilitando reducir drásticamente el peso de las naves y el coste total de la misión. Pudiendo ser interesante utilizar energía de tipo nuclear durante el viaje, y también durante la estancia en Marte, se analiza el uso de este tipo de energía para abastecer energéticamente la colonia en el apartado 8.1 Energía nuclear.

En el mismo año de creación de la NASA, se conocieron los cinturones de radiación de Van Allen gracias a los satélites Explorer 1 y 3; que junto a los rayos cósmicos, las llamaradas solares y el reactor nuclear de la nave del estudio, obligan a tener un fuerte blindaje frente a la radiación ya en la propia nave en la que se realiza el viaje a Marte. Por este motivo, la NASA decidió incluir un blindaje contra la radiación para evitar superar los 100 rem (Roentgen Equivalent Man) durante los 420 días de duración de la misión. Para estar seguros de no superar este límite en nuestro estudio, es importante determinar con precisión la naturaleza y la cantidad de radiación en el espacio, siendo útil la medición de instrumentos como el RAD del Curiosity y que la primera colonia instalada en Marte sea capaz de recoger este tipo de datos tan importantes para la seguridad de los habitantes de la misma.

A nivel de desarrollo actual, se sabe que el plomo tiene buenas propiedades para realizar funciones de aislante frente a la radiación, pero también se están descubriendo materiales poliméricos mucho más ligeros que también poseen propiedades aislantes.

- Misiones EMPIRE (Early Manned Planetary-Interplanetary Roundtrip Expeditions)

Se trata de un tipo de misión surgido en la década de los sesenta con el objetivo de hacer expediciones de ida y vuelta sobrevolando Marte. Surge en una época donde la NASA había centrado sus intereses completamente en la Luna, lo que retrasó el desarrollo de misiones tripuladas a Marte y únicamente se realizaron con éxito misiones no tripuladas con el fin de conocer más detalladamente el planeta.

- Misión Boeing

Publicado en el año 1968, como resultado de un estudio encargado por la NASA a la empresa Boeing, se trata de una nave propulsada por sistemas nucleares con el objetivo de permanecer durante 30 días en la superficie marciana, con una nave de descenso de forma cónica, la cual se debe simplemente a utilizar el diseño del módulo



Apollo para reducir costes, resultando un módulo demasiado pequeño para tratarse de una colonia permanente como la del presente estudio. Por otro lado, tiene un sistema de propulsión en la parte inferior que no es necesario para nuestra colonia debido a que su finalidad es permitir el ascenso para después realizar el viaje de regreso a la Tierra,

Un año después de este estudio, tuvo lugar la llegada del hombre a la Luna, lo que motivó el interés por realizar el viaje tripulado a Marte. Desgraciadamente, por otro lado aumentó la exploración de Marte mediante rovers de exploración y se vieron reducidas las posibilidades de encontrar vida en Marte, perdiendo con ello una de las mayores motivaciones e intereses que ayudaban a conseguir mayores presupuestos para realizar estudios y la propia misión.

- Misión de Paine y Von Braun

Después de perder las esperanzas de encontrar vida extraterrestre en Marte, Paine y Von Braun intentaron reavivar la motivación por realizar una misión a Marte al conseguir unos presupuestos más ajustados reutilizando tecnología desarrollada para las misiones lunares. El planteamiento de esta misión consistió en permanecer en la superficie marciana entre 30 y 60 días con el objetivo de entender la geología marciana, realizar perforaciones en busca de agua y buscar alguna forma de vida.

Finalmente, esta misión no consiguió reavivar el interés por realizar el viaje a Marte, sino que la motivación vino por parte del éxito de la misión Viking iniciada en 1975 por la NASA, donde se consiguió la mayor cantidad de datos de Marte hasta la fecha. Esto motivó la realización de una serie de conferencias entre 1981 y 1996 en la Universidad de Colorado bajo el título “The Case for Mars”, donde se estudió la realización de misiones tripuladas a Marte utilizando los recursos del lugar para la supervivencia, concepto conocido como In-Situ Resource Utilization, o con sus siglas ISRU.

ISRU es un concepto que podemos encontrar desde la prehistoria, el cual consiste en utilizar los recursos del lugar para sobrevivir. Se trata de un concepto importante en una colonia humana que se encuentra tan lejos de la Tierra, ya que el aprovechamiento de los recursos del planeta de destino resulta muy útil para reducir el envío de naves de carga.

En esta misión de Paine y Von Braun, al igual que en muchas otras, se pretendía realizar ISRU para la fabricación del combustible de vuelta a la Tierra, aunque en nuestro caso se hace uso de ISRU para obtener agua que permita la supervivencia de los habitantes de la colonia en lugar de combustible.

- Misión de la Science Applications International Corporation (SAIC)

Se trata de una misión diseñada en 1984, que consiste en un viaje de ida y vuelta a Marte con el objetivo de realizar un descenso a la superficie marciana y recoger 400kg

de muestras con un rover presurizado. Lo que da la idea de que además de la colonia fija y permanente en la superficie marciana, es útil proporcionar a la colonia un rover presurizado que permita realizar mayores exploraciones del planeta (ver apartado 9 Líneas futuras de desarrollo).

- The 90 Day Study

Se trata de un estudio realizado en 1989 por un equipo de la NASA bajo petición del Presidente de los Estados Unidos. En este estudio se analizan los proyectos de exploración mediante misiones tripuladas a la Luna y a Marte, con el objetivo de establecer una base en la Luna que sirviese para después apoyarse en ella para realizar la misión tripulada a Marte. Finalmente, se le retiró el presupuesto y fue criticado por tratarse de un estudio demasiado caro y ambicioso.

Se puede sacar como conclusión, como se ve en el actual proyecto Mars One, que no es necesario realizar una parada en la Luna ni el entrenamiento de los tripulantes allí, lo que supondría un gran aumento de los costes que puede evitarse al construir réplicas de la colonia y de las condiciones marcianas en la Tierra.

- Misión de Semynov y Gorshkov

Esta misión planeada en 1991 fue el resultado de trabajar conjuntamente los dos países más avanzados en la exploración espacial hasta el momento, Estados Unidos y la actual Rusia.

Se han encontrado ideas en esta misión útiles para afrontar los problemas de radiación y generación de energía, solventados con tanques de agua para proteger a los tripulantes de la radiación, y por otro lado, el uso de paneles solares de 40000 m<sup>2</sup> de superficie para proporcionar 7,6 MW de potencia en las proximidades de la Tierra y 3,5 MW al llegar a Marte.

- Misión Mars Direct

Se trata de una misión ideada en 1990 con el objetivo de enviar una nave tripulada en 1999 para explorar Marte durante 500 días mediante el uso de un rover presurizado. Durante estos 500 días llegaría a Marte un segundo módulo de carga que permitiría a los tripulantes hacer uso de él si hubiese algún problema, pero si no lo hubiera, aterrizaría a 800 km de distancia para permitir realizar una futura misión e ir formando colonia en Marte.

En esta misión, estaba previsto el uso de ISRU, de un reactor nuclear de 100 KW integrado en un camión teledirigido y de una nave con capacidad para cuatro personas con una forma cilíndrica de 5 m de altura y 8,4 m de diámetro, permitiendo dividir el espacio útil en dos plantas, proporcionando el espacio suficiente para los tripulantes en la planta superior y para la carga en la inferior. Esto supone 227 m<sup>3</sup> de volumen total, correspondiendo un espacio útil de 113,5 m<sup>3</sup> para los cuatro tripulantes.

De esta misión, se toma la idea de realizar una primera colonia donde tomar datos fiables y enfrentarse a los problemas que surjan, de cara a realizar futuras colonias perfeccionadas tras adquirir mayor experiencia.

- **Misión Design Reference Mission (DRM)**

Estimando la llegada a Marte en 2008, se trata de una misión bastante similar a Mars Direct, con diferencias en el diseño de la nave de retorno, sin importancia para nuestro estudio por tratarse de una colonia permanente; diseños estándares para el módulo habitacional de transporte y el de estancia en Marte; y finalmente, la interesante idea de una tripulación formada por personas con diferentes destrezas, como puede verse en el apartado 4.1 Habitantes, resultando útil para poder desarrollar una mayor cantidad de tareas con un número reducido de personas.

- **Vision for Space Exploration**

Se trata de un documento publicado el 14 de enero de 2004 a petición del presidente de EE.UU. George W. Bush. En él se prevé la creación de un puesto avanzado en la Luna en el año 2020, lo que permitiría la realización de misiones a Marte desde allí.

Respecto al puesto avanzado en la Luna, se trata del mismo planteamiento del estudio “The 90 Day Study” descrito anteriormente. A pesar de no ser importante para nuestro trabajo realizar las misiones partiendo desde la Tierra o desde la Luna, se ha comentado que se le retiró el presupuesto y fue criticado por tratarse de un estudio demasiado caro y ambicioso. Además, puede verse en proyectos más recientes, como Mars One, que no es necesario realizar ningún puesto avanzado en la Luna, lo que supondría un gran aumento de los costes que puede evitarse al construir réplicas de la colonia y de las condiciones marcianas en la Tierra.

### **3.3 Futuras misiones tripuladas**

En primer lugar, la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) prevé la posibilidad de realizar misiones tripuladas a Marte, aunque sin fijar una fecha específica para ello. Por otro lado, Michael Griffin, el entonces administrador de la NASA, dijo en 2007 que el objetivo de la NASA era poner al hombre en Marte sobre el año 2037.

Sin embargo, este objetivo de la NASA se ve superado por el proyecto Mars One, que tiene previsto la llegada del primer grupo de humanos a Marte en 2025, como se detalla en el siguiente apartado.

### 3.3.1 Mars One

Hablar de futuras misiones tripuladas es hablar de Mars One, ya que se trata de un proyecto privado y televisivo que ya se está realizando con el objetivo de establecer una colonia humana permanente en Marte, empezando con una misión no tripulada en el año 2018 y seguidamente enviando cuatro personas en el año 2024, a las que se irán sumando cuatro personas más cada dos años.



**Figura 3.2** Recreación de la colonia del proyecto Mars One. Fuente: Mars One / Bryan Versteeg

Debido a ser una colonia permanente, los creadores del proyecto estiman que el coste será menor que en una misión normal porque en este caso solo habrá viaje de ida, quedándose a vivir en Marte todas las personas que participen. A pesar de esta reducción de costes, se estima que realizar el proyecto alcanzará un coste de 6 000 millones de USD.

Para lograr la financiación se toma un modelo de negocio de reality show con el que intentan conseguir patrocinadores y donativos en su página web, donde se puede donar entre 2 y 200 USD mensuales. En este mismo lugar podemos ver un ranking de los países que más dinero han donado para el proyecto hasta el momento, estando a día 18 de febrero de 2014 Estados Unidos en primer lugar con 224222 USD.

Para llevar a cabo la misión, se ha contactado con posibles proveedores en el año 2011 y se llegó a la conclusión de que era posible realizarla con la tecnología existente actualmente. Por ejemplo, uno de estos contactos fue con la primera empresa privada que ha realizado servicios de transporte para la Estación Espacial Internacional, llamada SpaceX.

Después, el pasado mes de abril de 2013 se abrió el “Astronaut Selection Program”, donde pueden inscribirse personas de todos los países del mundo y se realiza la selección de candidatos pasando por diferentes etapas durante dos años. Debido a que la idea es enviar nuevos grupos de cuatro personas cada dos años, se abre el “Astronaut Selection Program” cada año.

Finalmente, existe una alta planificación del proyecto para los próximos años:

Después de este periodo de selección, en 2015 seis equipos de cuatro personas realizarán diferentes entrenamientos hasta el inicio del viaje en 2024. Durante este periodo de entrenamiento la parte más importante es pasar largos periodos de tiempo aislados, pero también está previsto construir una réplica de la colonia y del hábitat marciano en el desierto Ártico, donde se efectuarán pruebas tecnológicas y aprenderán a reparar diferentes componentes, procedimientos médicos y cultivar su propia comida.

En mayo de 2018 tendrá lugar una misión de demostración para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas tecnológicos; además, se lanzará un satélite de comunicaciones que permanecerá en la órbita de Marte, permitiendo la transmisión de datos, imágenes y videos desde la superficie marciana hasta la Tierra.

En el año 2020 se lanzará un rover que se desplazará por la región elegida para establecer la colonia con el fin de buscar un lugar suficientemente plano como para construir el asentamiento, preparando la superficie para la llegada de futuras misiones y para la instalación de la colonia. Esta región previamente seleccionada, tiene que estar lo suficientemente cerca del polo norte para que el suelo contenga bastante agua, y cerca del ecuador para obtener la máxima energía solar posible.

Este mismo año, se pondrá en órbita un segundo satélite de comunicaciones. Éste último orbitará alrededor del Sol y en la misma órbita que la Tierra, pero 60 grados retrasado para permitir así la comunicación incluso cuando el Sol se sitúe entre ambos planetas.

En julio de 2022 está previsto realizar seis misiones de carga para llevar dos "Living Units", dos "Life Support Systems" y dos "Supply Units". En febrero de 2023, las unidades enviadas a Marte serán también utilizadas como balizas, permitiendo una mayor precisión en futuros aterrizajes.

En 2023 llegarán las misiones de carga y el Rover comenzará el acondicionamiento antes de la llegada de los humanos. Para ello se ayudará del remolque y colocará en el lugar correcto las diferentes unidades, utilizando los paneles solares de éstas para poder recargar sus baterías y realizar el trabajo más rápidamente.

Establecerá los "Life Support System" conectando las "Life Support unit" con las "Living Units" y permitiendo con ello el transporte de agua, aire y electricidad. Antes de que la tripulación comience su viaje, el Rover recogerá tierra marciana con el fin de depositarla sobre las "Living Units" para blindarlas frente a la radiación y también para alimentar al "Life Support System", que mediante un horno consigue evaporar el agua contenida en la tierra, con el fin de almacenar agua líquida tras la condensación y usar parte de este agua para producir oxígeno. Filtrando el nitrógeno y el argón de la propia atmósfera, se espera tener antes del comienzo del viaje de la tripulación una atmósfera respirable a 0,7 bar, 3000 l de agua y 120 kg de oxígeno.

En abril de 2024 está previsto el inicio del viaje del primer grupo de humanos, viajando primero por la órbita terrestre hasta conectar "Transit Habitat" y "Mars Lander" con dos etapas de combustible que se enviarán un mes más tarde. A partir de este punto, el viaje durará 210 días y ya no será posible regresar a la Tierra. Además, las misiones de carga para el siguiente grupo de humanos empezarían ese mismo mes.

En 2025, está previsto hacer historia, ya que el primer grupo de humanos llegará a Marte. Antes de efectuar la llegada a la superficie, los tripulantes pasarán al módulo de amortizaje y abandonarán el "Transit Habitat" debido a que éste último es demasiado grande para aterrizar en Marte. Una vez efectúen el aterrizaje, pasarán 48 horas para acostumbrarse a la gravedad marciana y serán recogidos por el rover. Seguidamente, pasarán otros días aclimatándose en las "Living units" para después desplegar el resto de paneles solares e instalar las "Food Production units".

Semanas después, llegarán las misiones de carga de la segunda tanda de tripulantes y se instalarán las diferentes unidades añadiendo redundancia a la colonia, que ya tenía capacidad para el doble de personas. Con ello se consigue aumentar la seguridad, la cual es muy importante debido a que en caso de emergencia los habitantes no pueden regresar a la Tierra, sino que tendrían que cambiarse a otro módulo.

Posteriormente, en octubre de 2026 está previsto el comienzo del viaje del segundo grupo de personas y de las misiones de carga para el tercero. Esperando que en julio de 2027 se unan con el primer grupo, que ya estará adaptado a vivir en Marte.

Finalmente, la idea del proyecto Mars One es repetir este último proceso cada dos años con el fin de aumentar continuamente la colonia.

# Capítulo 4

---

## Descripción de la colonia



## **4 Descripción de la colonia**

En este capítulo se determina el número de habitantes que forma la colonia, los riesgos de salud a los que se exponen en Marte, la ubicación de la colonia y su diseño.

### **4.1 Habitantes**

Se determina que la tripulación tiene que estar formada por personas con diferentes destrezas, al igual que en la misión DRM (Design Reference Mission) y en el proyecto Mars One, lo que resulta útil para desarrollar una amplia variedad de tareas con un número reducido de personas.

Por ello, la colonia estará formada por seis personas con las destrezas de psicología, medicina, ingeniería, astronomía, geología y biología.

### **4.2 Riesgos de salud**

El ser humano ha evolucionado durante muchos años con las condiciones presentes en la Tierra, por ello, no es raro que surjan problemas de salud por vivir con las condiciones presentes en el espacio o en otros planetas, como en este caso Marte.

#### **4.2.1 Problemas psicológicos**

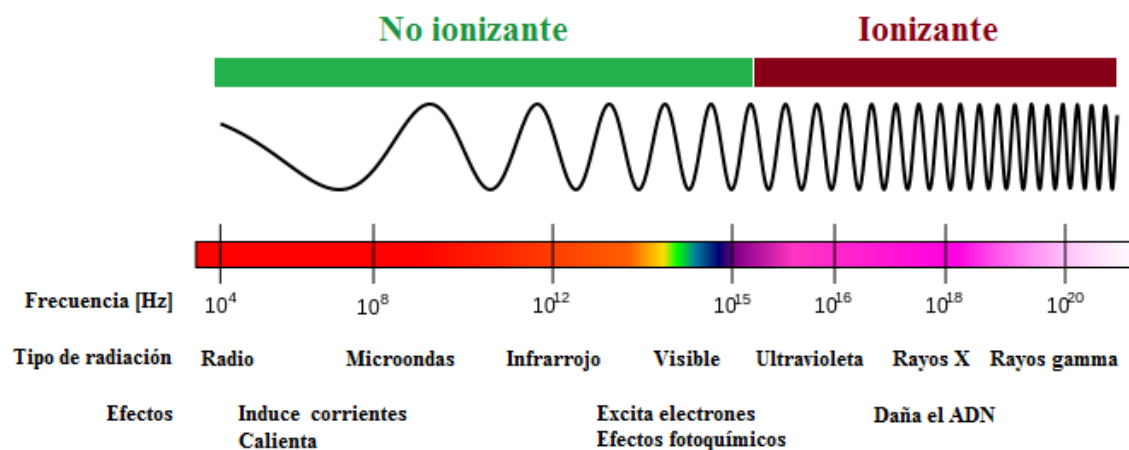
Una preocupación desde el primer estudio de una misión tripulada a Marte por Von Braun (ver apartado 3.2 Antecedentes de misiones tripuladas), es el hecho de permanecer durante largos periodos de tiempo encerrados en un espacio reducido, lo que puede afectar en el comportamiento de los tripulantes, produciendo problemas psicológicos que podrían derivar incluso en asesinatos.

Esta preocupación de Von Braun, ha sido considerada junto con posibles estados depresivos de la tripulación en nuestro estudio, determinando como necesaria la presencia de al menos un psicólogo en la colonia. Debido al gran aislamiento entre la Tierra y Marte debido a su lejanía, junto al hecho de no contar con una fecha de vuelta a la Tierra, se debe contemplar la posibilidad de que el psicólogo también sufra alguno de estos problemas, siendo un peligro potencial para la supervivencia de toda la tripulación. Por tanto, se determina que en nuestra colonia se precisa de dos psicólogos o uno solo pero con la posibilidad de establecer conexión con otros psicólogos de la Tierra en momentos puntuales, siendo esta última la opción elegida y estableciendo la comunicación con los medios descritos en el apartado 4.4.6 Comunicaciones.



#### 4.2.2 Radiación

La radiación consiste en la propagación de energía a través de un medio material o incluso en el vacío en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas. En función de la longitud de onda, ordenadas de mayor a menor, existen ondas de radio, microondas, infrarrojas, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Estas ondas pueden clasificarse en ionizantes y no ionizantes, siendo radiaciones ionizantes la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, ya que son capaces de penetrar en los materiales y dar lugar a la ionización de los átomos y ruptura de enlaces químicos, lo que en dosis elevadas causa problemas de salud para los seres vivos e incluso la muerte (ver Figura 4.1).



**Figura 4.1** Tipos de radiación. Fuente: elaboración propia con datos de United States Environmental Protection Agency

La radiación no ionizante, resulta menos peligrosa pero puede inducir corrientes eléctricas que sobrecarguen y dañen equipos eléctricos o electrónicos, generen chispas con el riesgo de provocar un incendio o una explosión, y finalmente, también pueden crear interferencias con otras señales electromagnéticas.

Por otro lado, la radiación ionizante, conocida típicamente como radiación, se relaciona con procesos nucleares y atómicos como los que suceden en una máquina de rayos X o un reactor nuclear que genera artificialmente radiación alfa, beta, gamma y de neutrones.

Los tipos de radiación más comunes son los siguientes:

- **Alfa:** se trata de la emisión de partículas cargadas positivamente constituidas por dos protones y dos neutrones, es decir, núcleos de helio. Este tipo de radiación la emiten elementos con alto número atómico debido a que tienen muchos protones y su repulsión eléctrica es muy fuerte. Debido a su composición son muy ionizantes pero poco penetrantes y por su carga pueden ser desviadas por campos eléctricos y magnéticos.

- Beta: se trata de la emisión de electrones (beta negativo) o de positrones (beta positivo) que resultan de la desintegración del núcleo atómico, lo que varía el número atómico del elemento. Resulta más penetrante que la alfa pero también puede ser desviada por campos magnéticos.
- Gamma: se trata de la emisión de fotones u ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, por lo que tienen una longitud de onda muy pequeña que la convierte en el tipo de radiación más penetrante y peligroso, necesitando capas gruesas de hormigón o plomo para detenerla. En este caso la estructura del átomo se conserva pero con un estado de energía menor.

Sin embargo, también existen materiales naturales, el propio Sol y rayos cósmicos que emiten radiación ionizante perjudicial para la salud, denominada radiactividad natural (existente en la naturaleza sin intervención humana) y descubierta en 1896 por Henri Becquerel. Debido a que la dosis de radiación total recibida es la suma de la natural y la artificial, la Unión Europea, mediante la Directiva 96/29/EURATOM, limita la dosis para trabajadores expuestos a radiación, las trabajadoras embarazadas o en periodo de lactancia y el público en general, con el objetivo de no alcanzar dosis dañinas para el organismo.

La dosis recibida por una persona se determina como la tasa de dosis multiplicada por el tiempo de exposición, existiendo diferentes unidades para medir la radiación como el gray (Gy), equivalente a 100 rad, que mide la energía de radiación ionizante por masa de material irradiado o el sievert (Sv), equivalente a 100 Roentgen Equivalent Man (rem), que está ponderado según el daño biológico que producen los diferentes tipos de radiación. Por ello, se cumple la equivalencia  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$  para las radiaciones electromagnéticas (rayos X y gamma) y los electrones, pero hay que aplicar un factor de corrección para otros tipos de radiaciones, como la debida a la emisión de partículas alfa o neutrones.

Los niveles a los que la Directiva 96/29/EURATOM limita la dosis son 100 mSv durante un período de cinco años consecutivos para trabajadores expuestos a radiación, con una dosis máxima de 50 mSv en cualquiera de estos años. Por otro lado, para una mujer embarazada la dosis máxima se reduce a niveles de la población ordinaria, con un límite de 1 mSv por año, permitiendo ser superada en el caso de la población siempre que el promedio durante cinco años consecutivos no supere 1 mSv/año.

La forma a través de la que la radiación afecta a las personas puede ser de diferentes tipos: exposición externa si la fuente de radiación está fuera del cuerpo o interna si el material radiactivo ha entrado al cuerpo.

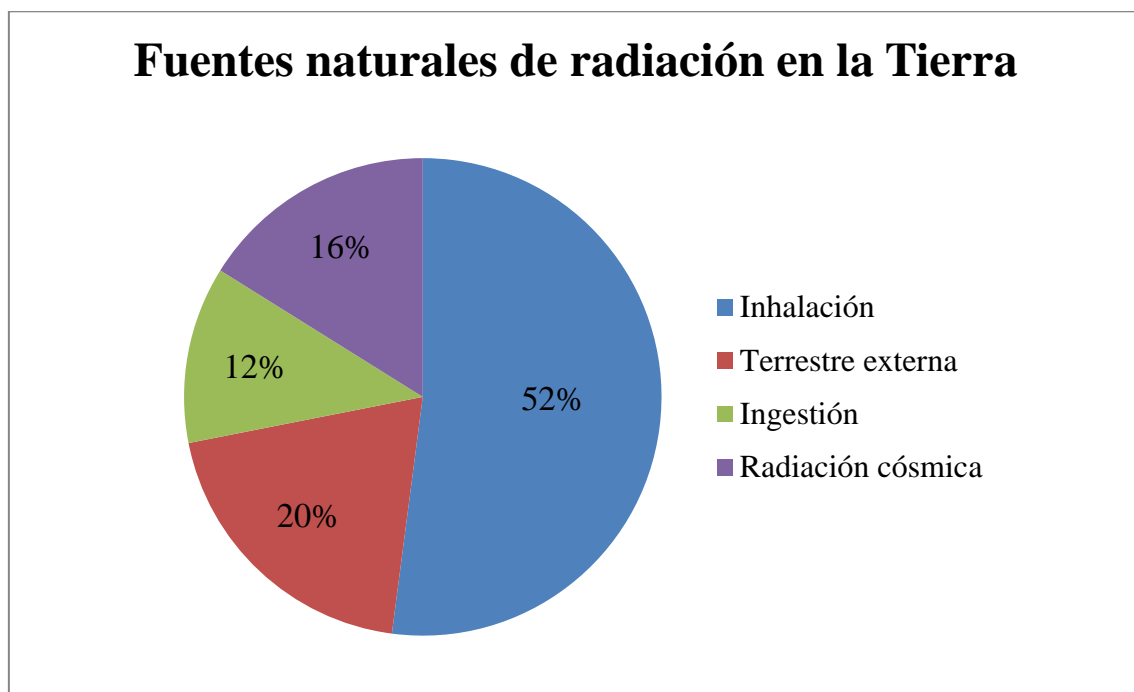
En el caso de exposición externa la dosis recibida disminuye con la distancia o el tiempo de exposición, sin embargo, en el caso de exposición interna el material radiactivo afecta a las células el tiempo que el material esté en el cuerpo, que depende

de la forma física y química del material, así como de la manera en la que se introdujo en el cuerpo, pudiendo ser a través de heridas en la piel, como alimento y por la inhalación de gases o partículas radiactivas. Siendo finalmente expulsado de la misma manera y en el mismo tiempo que lo harían los isótopos no radiactivos del mismo elemento químico.

Gracias a UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), se sabe que la dosis media anual recibida por fuentes naturales es de 2,42 mSv, como puede verse en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.2, resultando ser más de dos veces superior al límite establecido en Europa por Directiva 96/29/EURATOM para la población general sin ocasionar daños en el organismo.

Fuente	Dosis media anual [mSv]	Rango típico de dosis anual [mSv]
Inhalación	1,26	0,2 - 10
Terrestre externa	0,48	0,3 - 1
Ingestión	0,29	0,2 - 1
Radiación cósmica	0,39	0,3 - 1
Natural total	2,4	1 - 13

**Tabla 4.1** Dosis media anual de radiación recibida por fuentes naturales. Fuente: Naciones Unidas



**Figura 4.2** Distribución de la dosis media en función de las fuentes naturales de radiación en la Tierra. Fuente: elaboración propia con datos de Naciones Unidas

A pesar de que a estos niveles no se observan efectos sobre el organismo, se sabe que dosis mayores causan diferentes síntomas e incluso la muerte, como se muestra en la Tabla 4.2 para dosis medidas en mSv y en la Tabla 4.3 medidas en rads.

Dosis recibida [mSv]	Efectos sobre la salud de las personas
0 - 10	No hay evidencia directa de los efectos en la salud
10 - 1000	No hay efectos a corto plazo, pero aumenta la cantidad de ciertos tipos de cáncer en las poblaciones expuestas a altas dosis
1000 - 10000	Riesgo de muerte, aumenta la cantidad de ciertos tipos de cáncer en las poblaciones expuestas
superior a 10000	Mortal

**Tabla 4.2** Efectos de la radiación (en mSv) sobre la salud de las personas. Fuente: Naciones Unidas

Dosis recibida [rads]	Efectos sobre la salud de las personas
0 a 50	Sin efectos aparentes. Posibles cambios menores en la sangre o anorexia.
50 a 100	Probables vómitos y náuseas durante aproximadamente un día. Fatiga no muy acusada y reducción transitoria de linfocitos y neutrófilos.
100 a 200	Vómitos y náuseas durante aproximadamente un día. Seguido de una reducción en torno al 50 % de linfocitos y neutrófilos, además de otros síntomas como enfermedad por radiación en el 50 % de los casos y la muerte en un porcentaje menor al 5 %.
200 a 350	Entre el 50 % y 90 % de los casos sufren vómitos y náuseas desde el primer día. Seguido de otros síntomas de la enfermedad por radiación como pérdida de apetito, diarrea o hemorragias menores. Entre el 5 % y el 90 % de los casos termina en la muerte entre dos y seis semanas después de la exposición, quedando convalecientes los supervivientes durante tres meses.
350 a 550	Vómitos y náuseas además de otros síntomas de la enfermedad por radiación, como fiebre, hemorragias y diarrea. Más del 90 % de muertes en un mes, quedando convalecientes los supervivientes durante seis meses.
550 a 750	Vómitos y náuseas cuatro horas después de la exposición, seguido de fuertes síntomas de la enfermedad por radiación. Hasta el 100 % de muertes y los pocos supervivientes quedan convalecientes aproximadamente seis meses.
en torno a 1000	Vómitos y náuseas en torno a una o dos horas. Probablemente ningún superviviente.
en torno a 5000	Muerte segura con una incapacitación casi inmediata.

**Tabla 4.3** Efectos de la radiación (en rads) sobre la salud de las personas. Fuente: NASA

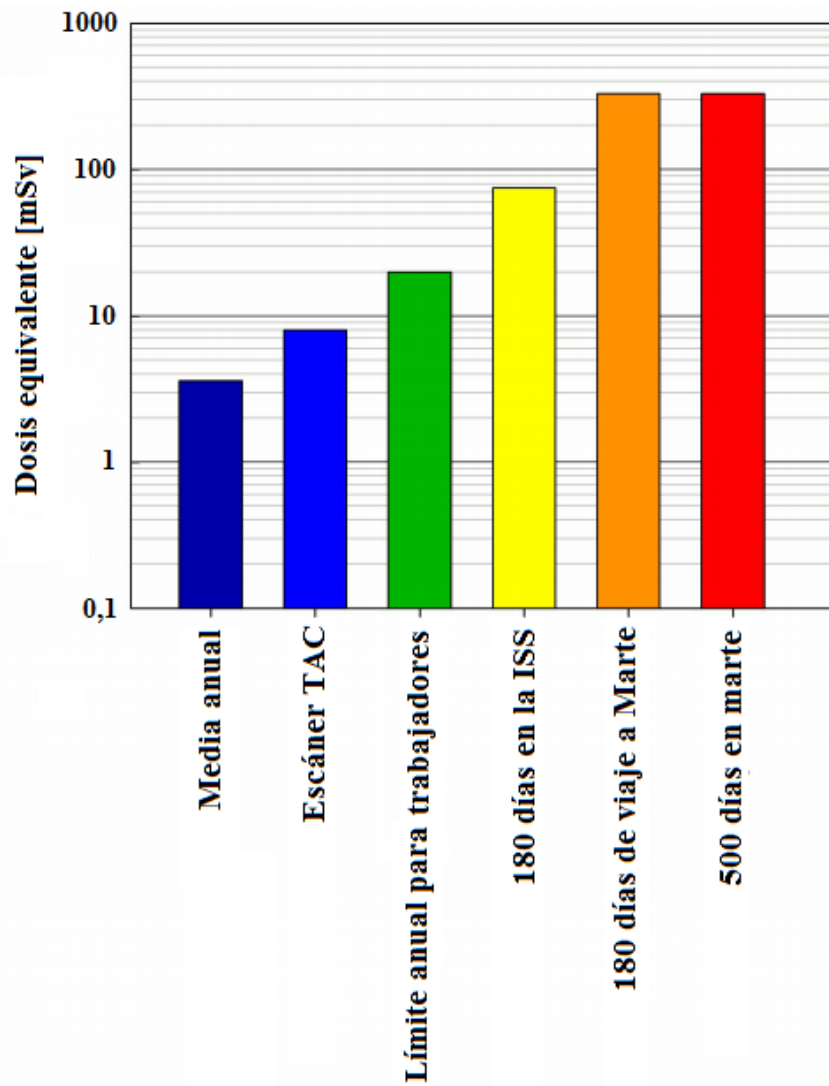
Estos efectos se deben a que se dan reacciones a nivel celular produciendo que la multiplicación de las células se detenga, cambios en la permeabilidad de las membranas, en el agua que forma gran parte del citoplasma y daños en el núcleo, pudiendo derivar en alteraciones de los cromosomas que provoquen que la célula que se divida lo haga con unas características diferente a la célula original. Por ello, a pequeñas dosis menores de 100 mSv no se espera ningún problema de salud pero con dosis de 4000 Sv la mitad de los individuos muere, estando entre ambos la alteración en la reproducción de células con alta tasa de renovación como las intestinales o las células de la médula ósea, posibles mutaciones genéticas y la formación de cáncer. Sin embargo, la radiación puede resultar beneficiosa en casos como la radioterapia, donde se aplican grandes dosis de radiación a áreas limitadas, con lo que se consigue eliminar tejidos malignos en el cuerpo, aunque también puede afectar a órganos sanos cercanos.

A diferencia de la Tierra, en Marte únicamente existen remanentes de campos magnéticos y su atmósfera tiene aproximadamente un 2 % de la densidad de la terrestre, lo que permite que mayor cantidad de radiación ionizante llegue a la superficie marciana. Esto se debe a que el campo magnético terrestre desvía gran parte del viento solar actuando como blindaje natural para las partículas cargadas de alta energía procedentes del Sol, además, la atmósfera terrestre, principalmente el ozono, es capaz de absorber gran parte de la radiación solar ionizante de alta frecuencia que resulta muy dañina para los seres vivos, por lo que gracias a ambos efectos se consigue formar un “escudo” que posibilita la vida tal y como la conocemos en la Tierra.

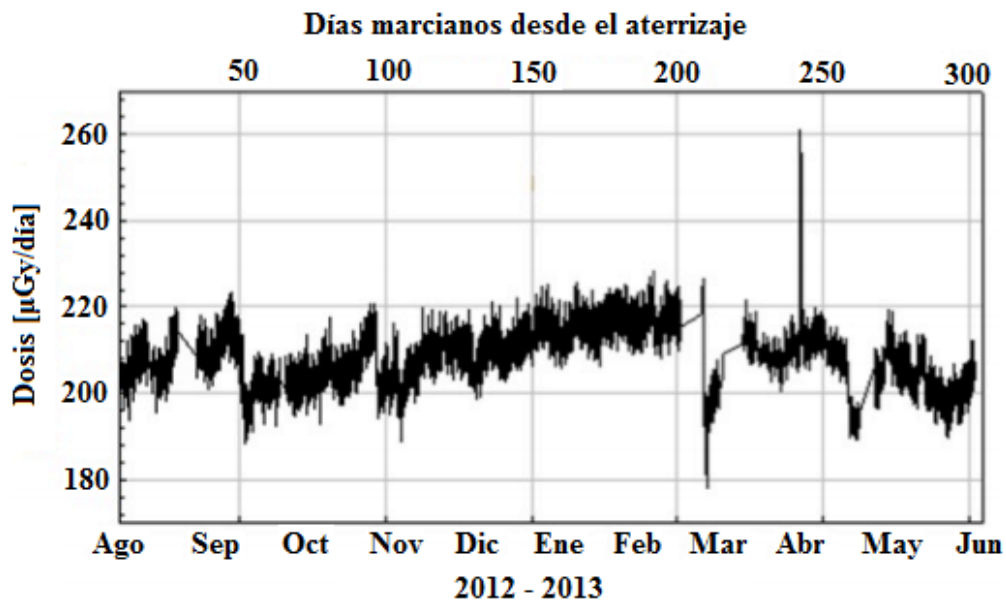
Por este motivo, en los estudios de misiones espaciales se incluyen blindajes contra la radiación para evitar superar límites que provoquen efectos dañinos sobre el organismo. Por ejemplo, la NASA limitó a 100 rem, el equivalente a 1000 mSv, como límite máximo admisible en una misión de 420 días de duración. Para estar seguros de no alcanzar dosis dañinas, es necesario determinar con precisión la naturaleza y la cantidad de radiación, siendo necesario para diseñar correctamente el blindaje de la colonia. Por ello, es útil para el estudio de la colonia la medición realizada por instrumentos como el RAD del Curiosity, así como que la colonia sea capaz de recoger este tipo de datos para permitir el diseño de posibles colonias futuras con mayor precisión, aumentando la seguridad de los habitantes de la misma.

Para conocer la radiación existente en Marte, siendo un dato imprescindible para el diseño de la colonia, se instalaron sensores como el MARIE en el Mars Odyssey o el RAD en el Curiosity. Con el primero de ellos se descubrió que el nivel medio de radiación en la órbita de Marte es de 22 milirads/día, aproximadamente dos veces y media superior que en la Estación Espacial Internacional. Pudiendo ser menor en la superficie del planeta debido a la atmósfera, tomando este dato en tres años se estaría cerca de alcanzar los límites de radiación establecidos por la NASA. Además, eventos ocasionales como tormentas solares aumentarían notablemente estos niveles, pudiendo ser advertidos mediante sensores cercanos al Sol pero aun así, se necesita un blindaje mayor o una zona de la colonia más protegida para garantizar la seguridad durante estos eventos.

Por otro lado, gracias al instrumento RAD se conoce la radiación en Marte e incluso durante el viaje al mismo (ver figura 4.3). Esta radiación medida por el Curiosity ha tomado unos valores de 0,48 mGy/día durante el viaje y de 0,21 mGy/día (76 mGy/año terrestre) en la superficie marciana cercana al cráter Gale. Estos datos se corresponden con la media de los 300 días marcianos posteriores al aterrizaje, donde se han alcanzado picos de hasta 0,26 mGy/día (ver Figura 4.4).

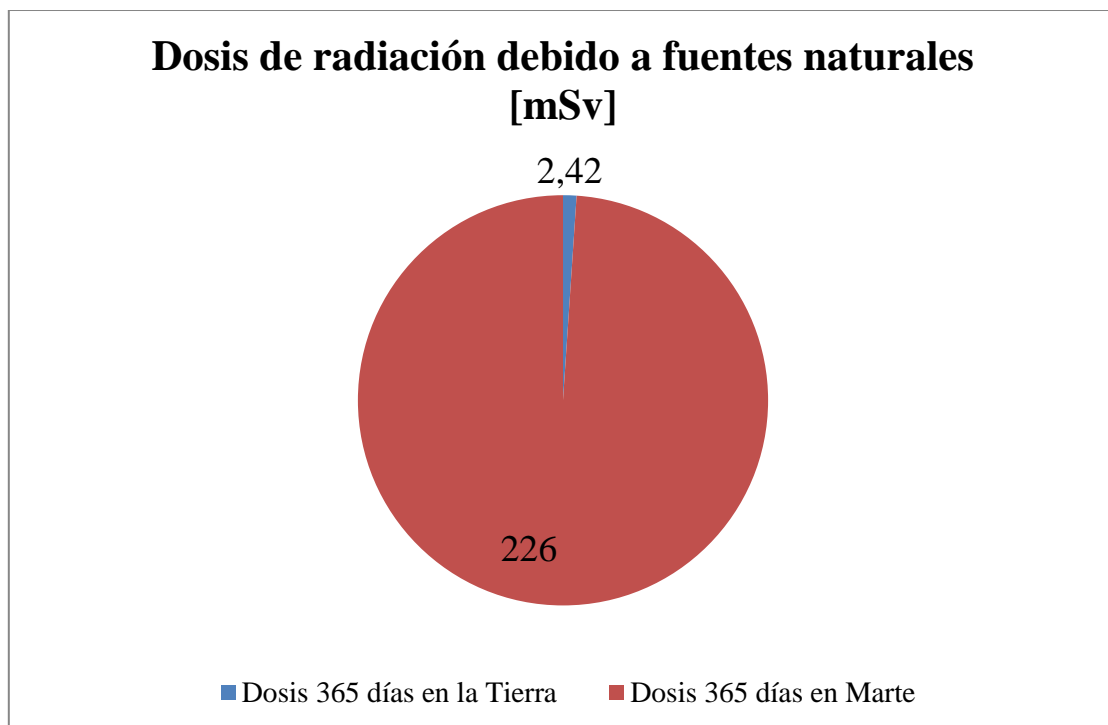


**Figura 4.3** Dosis de radiación recibida por diferentes fuentes. Fuente: NASA



**Figura 4.4** Radiación en Marte medida por el instrumento RAD del rover Curiosity. Fuente: NASA

Como puede verse en la Figura 4.3, la dosis de radiación recibida durante una estancia de 500 días en la superficie marciana es de 310 mSv, lo que equivale a 226 mSv/año terrestre, aproximadamente cien veces superior a la radiación existente en la superficie terrestre originada por fuentes naturales (ver Figura 4.5).



**Figura 4.5** Dosis anual en la Tierra y en Marte según el instrumento RAD del rover Curiosity. Fuente: NASA



#### 4.2.2.1 Protección

Debido a la alta radiación existente sobre la superficie marciana, es necesario reducir la dosis recibida por los habitantes de la colonia. Para lograr reducir la radiación recibida de cualquier fuente de radiación existen tres pilares fundamentales: reducir el tiempo de exposición, aumentar la distancia con la fuente e interponer un blindaje.

En primer lugar, reducir el tiempo de exposición y aumentar la distancia a la fuente no son soluciones posibles, ya que vivirán constantemente en la colonia y la principal fuente de radiación, el Sol, se encuentra a una distancia determinada que no podemos modificar. Por ello, la única solución posible al problema de la radiación sobre la superficie marciana es instalar un blindaje en la colonia.

El blindaje consiste en interponer una pantalla protectora entre la fuente radiactiva y las personas, del mismo modo que se aplica crema solar para reducir los rayos ultravioletas que llegan a la piel cuando se toma el Sol. Las pantallas utilizadas como blindaje de radiación son comúnmente láminas de plomo o acero, muros de hormigón y cristales especiales enriquecidos con plomo. Aunque, en estudios anteriores de misiones a Marte se encuentran otras ideas para proporcionar dicho blindaje. Por ejemplo, Stuhlinger ideó una misión tripulada donde se usa un revestimiento de grafito, mientras que la misión de Semynov y Gorshkov usa tanques de agua para proteger a la tripulación de la radiación.

Finalmente, a nivel de desarrollo actual, se sabe que el plomo tiene buenas propiedades para realizar funciones de aislante frente a la radiación, pero también existen materiales poliméricos mucho más ligeros con los que también se consigue un buen aislamiento, dependiendo la eficacia del material del tipo de radiación a aislar de la siguiente manera:

- Partículas alfa: bloqueadas por cualquier material sólido de varios milímetros espesor.
- Partículas beta: son más efectivos los materiales de bajo número atómico, debido a que aumenta con el número atómico la radiación gamma secundaria que se produce con la interacción de las partículas beta con el material aislante.
- Radiación gamma: son más efectivos los materiales con alto número atómico, debido a que a igualdad de masa, consiguen absorber mayor cantidad de radiación que los de bajo número atómico.
- Radiación neutrónica: debido a que el absorbente más eficaz es el hidrógeno, son más efectivos los materiales que lo contengan, como el agua, el hormigón o el plástico. También es efectivo el boro en el caso de tratarse de neutrones de baja energía.

Por tanto, es necesario diseñar un blindaje contra la radiación (ver apartado 9 Líneas futuras de desarrollo) teniendo en cuenta su intensidad y el tipo, ya que, los materiales óptimos dependen del tipo de radiación.



### 4.2.3 Gravedad

En este apartado, se analizan los problemas derivados de permanecer durante un largo periodo de tiempo con una aceleración de la gravedad de  $3,7 \text{ m/s}^2$  frente a los  $9,8 \text{ m/s}^2$  que existen en la Tierra y para los que los seres vivos hemos evolucionado durante años para adaptarnos al medio ambiente existente. Por ello, un cambio en la gravedad supone problemas para la salud que deben ser estudiados.

En primer lugar, los primeros días es posible sufrir mareos y náuseas porque la percepción recibida por los ojos no coincide con la sensación que nos transmite el oído interno para proporcionar nuestro equilibrio.

Seguidamente, debido a que el cuerpo humano está formado principalmente por agua y que existen multitud de fluidos corporales que posibilitan el correcto funcionamiento del cuerpo, se sabe que se dan problemas de salud por una disminución en la fuerza gravitatoria porque afecta al movimiento de los fluidos e incluso eleva hacia el pecho y la cabeza a los que se encuentran estáticos, ya que, se ven menos atraídos hacia abajo por la fuerza de la gravedad. Esto provoca, entre otras cosas, un aumento de la presión sanguínea en la cabeza que “se siente como si estuvieras colgado boca abajo”, según dijo el ex-astronauta de la NASA Mark E. Kelly.

Por otro lado, también derivado por una menor gravedad, el peso de los habitantes se ve reducido en igual medida (a un 38% del peso terrestre), lo que da lugar a una pérdida de masa muscular y debilitamiento de los huesos porque el cuerpo ya no necesita soportar ni la mitad del peso terrestre. Además de poder causar problemas de salud a los habitantes de la colonia marciana, también supone que en caso de volver a la Tierra el cuerpo sea débil, complicando tareas tan simples como el propio movimiento en la superficie terrestre. Para intentar paliar estos problemas, la colonia dispone de gimnasio para que los habitantes ejerciten su cuerpo con el fin de no aclimatarse a esta menor carga requerida para soportar el propio peso del cuerpo, consiguiendo mantener en la medida de lo posible la masa muscular, pero sin lograr mejoría en los problemas de descalcificación de los huesos.

Estos problemas derivados de una menor gravedad, se minimizan en los viajes espaciales con una rotación de la nave que genera una fuerza centrífuga que hace las funciones de fuerza de gravedad. Pero no puede solucionarse de la misma manera en la superficie marciana, donde la gravedad es un 38 % de la terrestre. Por ello, los problemas de salud generados no se pueden solucionar completamente, lo que puede derivar en problemas de corazón y del funcionamiento del cuerpo en general, dificultando también la vida de los habitantes en caso de volver a la Tierra, ya que, supondría un aumento de la gravedad a más de 2,5 veces a la que se han acostumbrado sus huesos y músculos durante los últimos años.

Para estudiar los efectos que produce la gravedad marciana en el organismo, el MIT (Massachusetts Institute of Technology) ha organizado el proyecto Mars Gravity Biosatellite, el cual financiado en parte por la NASA, se centra en la investigación de los cambios, pérdida y debilitación de la estructura ósea, la atrofia muscular y los cambios en el oído interno que afectan el balance. Para ello, los planes consisten en lanzar ratones en un satélite artificial que rotará sobre su propio eje para lograr el efecto de la gravedad de Marte durante cerca de 5 semanas.

#### **4.2.4 Meteoritos**

A pesar de que Marte está localizado relativamente cerca de la Tierra, el riesgo de recibir un impacto de un meteorito en la superficie marciana es mayor que en la terrestre. Esto se debe a que la mayoría de ellos se desintegran al atravesar la atmósfera, siendo mucho menos densa la marciana.

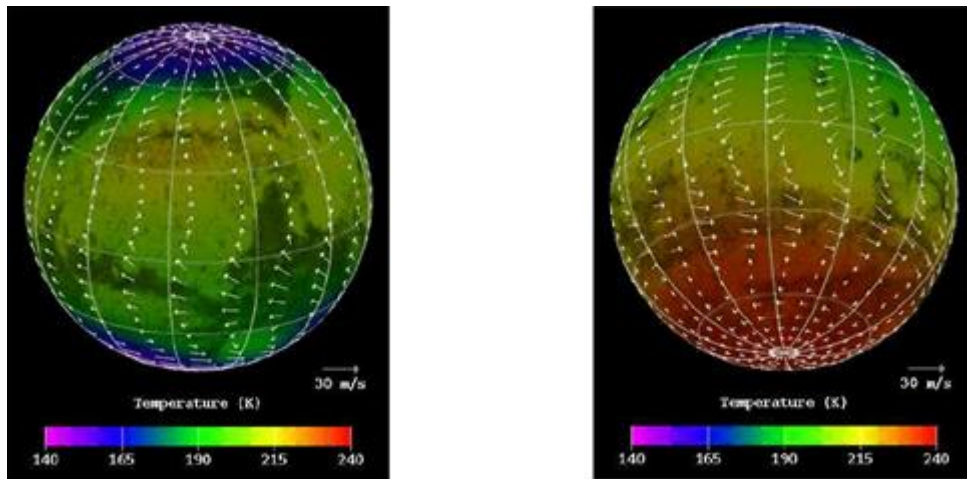
Finalmente, debido a la dificultad de prever impacto de los mismos con precisión, se ha tomado como solución que la colonia esté formada por diferentes módulos iguales (ver apartado 4.4.1 Líneas generales), permitiendo inutilizar alguno de ellos en caso de resultar dañado por el impacto de un meteorito o cualquier otro motivo.

### **4.3 Ubicación**

Para determinar la ubicación óptima para establecer la colonia se han analizado factores como la radiación solar, la temperatura, la abundancia de agua, la cantidad y fiabilidad de datos tomados hasta la fecha y la topografía. Determinando finalmente la ubicación en las coordenadas 22,48° N 49,97° O por los motivos que se detallan a continuación.

#### **4.3.1 Según radiación solar y temperatura**

En cuanto a la radiación solar y la temperatura, las zonas próximas al ecuador son más favorables debido a que la radiación solar incide de manera más perpendicular en el ecuador, la temperatura es menos extrema y tienen lugar menos variaciones estacionales (ver Figura 4.6), de manera similar a la situación que se da en nuestro planeta pero con una inercia térmica mucho menor debido a la inexistencia de mares y océanos. Por ambos motivos, la ubicación de la colonia debe ser cercana al ecuador, ya que, las bajas temperaturas de Marte (ver Figura 2.4) son más suaves en estas zonas, y además, se consigue mayor aprovechamiento de la energía solar, que es la principal fuente de abastecimiento de energía renovable (ver capítulo 6 Fuentes de energía renovable).



**Figura 4.6** Temperatura y viento en invierno (izquierda) y verano (derecha). Fuente: NASA/JPL-Caltech

### 4.3.2 Según abundancia de agua

Respecto a la abundancia de agua, es necesario que en la zona de la colonia exista suficiente concentración de hielo en el suelo y/o vapor en la atmósfera, ya que, estas son las dos fuentes de agua aprovechables mediante ISRU.

Para determinar las zonas con mayor cantidad en el suelo, se analizan las trazas de hidrógeno en el suelo marciano. Con este método, se ha sabido gracias a la sonda Mars Odyssey que la concentración es mayor en el polo norte pero a latitudes inferiores el agua también existía.

Por otro lado, la concentración de vapor de agua en la atmósfera es mayor en las zonas cercanas al polo norte, ya que, la principal fuente del mismo se da en el polo norte cuando tiene lugar la sublimación del CO<sub>2</sub> en estado sólido, a finales de primavera y principios de invierno. Por tanto, la concentración de vapor de agua es variable a lo largo del año y más alta en las zonas cercanas al polo norte, pero se cree que siempre menor a la cantidad de agua presente en estado sólido en la superficie marciana.

Por estos motivos, la colonia tiene que estar lo suficientemente cerca del polo norte para que el suelo contenga una cantidad suficiente de agua, pero también debe estar cerca del ecuador para que el clima sea lo más suave posible y obtener la máxima energía solar.

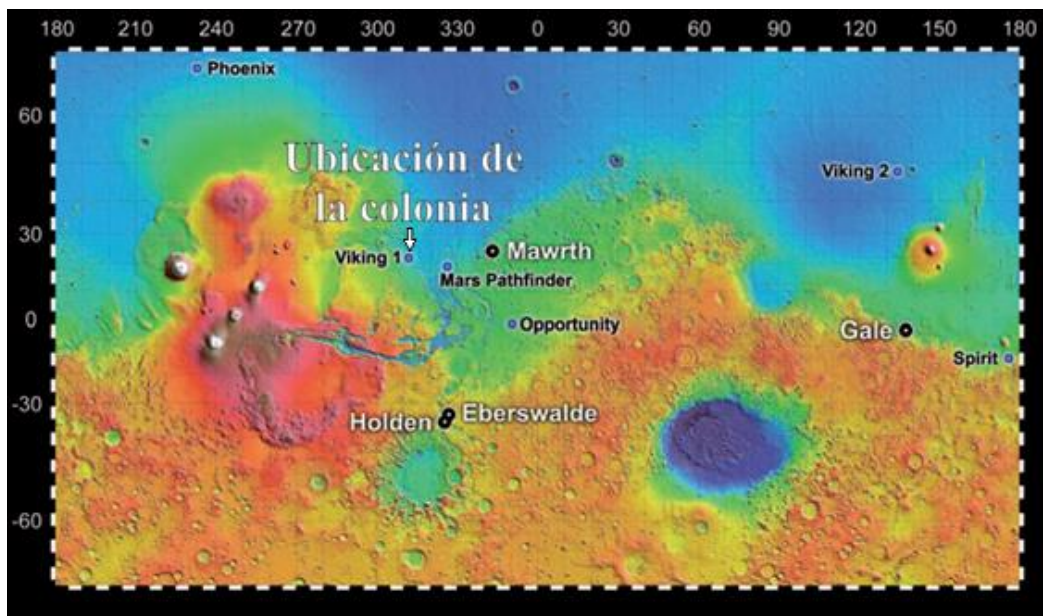
### 4.3.3 Selección de la ubicación de la colonia

Debido a los remanentes de campos magnéticos y a una altura baja respecto al nivel medio de la superficie, pueden encontrarse zonas donde la radiación sea menor, ya que como se ha visto en el apartado 4.2.2 Radiación parte de ella está formada por partículas cargadas que pueden ser desviadas mediante campos magnéticos y por otro lado, en zonas bajas la radiación tiene que pasar a través de una parte de la atmósfera

más gruesa que en zonas elevadas, lo que también reduce la cantidad de radiación. Debido a la falta de datos sobre los campos magnéticos en la superficie marciana, la única opción que se puede tomar para reducir la radiación es elegir un lugar situado por debajo del nivel medio de la superficie del planeta.

Finalmente, se ha elegido una ubicación que cumpla con las mejores condiciones en todos los aspectos en la medida de lo posible, siendo la región llamada Chryse Planitia, concretamente en las coordenadas 22,48° N 49,97° O situadas 1,5 km por debajo del nivel medio de elevación de referencia. Además de cumplir razonablemente bien todos los requisitos, también se ha elegido esta ubicación por ser el lugar de aterrizaje del rover de exploración Viking 1, que llegó a Marte en Junio de 1976 y gracias a él se consiguió la mayor cantidad de datos de Marte obtenidos hasta la fecha, lo que proporciona gran cantidad de datos útiles para realizar el estudio de establecer una colonia humana aprovisionada mediante energías renovables. Gracias a datos proporcionados por la NASA, se conocen en el lugar de ubicación de la colonia datos como la presión y la densidad atmosféricas, el viento en diferentes estaciones y durante las tormentas de arena, la temperatura media de -63 °C frente a los 14 °C terrestres y un rango de temperaturas con una temperatura máxima de -31 °C y una mínima de -89 °C (ver apartado 2 Marte).

Además de situarse en una zona donde se cumple en gran medida con todos los requisitos para conseguir las mejores condiciones posibles, se trata de una zona adecuada para realizar el aterrizaje, ya que en la misión Viking se buscó un lugar adecuado durante un mes desde la órbita marciana, aterrizando finalmente en este lugar. Aun así, resulta de gran interés analizar durante al menos un año marciano las condiciones ambientales antes de instalar una colonia para lograr un diseño lo más preciso posible, siendo interesante monitorizar las condiciones ambientales en la colonia para prevenir cualquier complicación de algún sistema y conocer en mayor medida el clima marciano. Finalmente puede verse la ubicación de la colonia en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Mapa de Marte con la ubicación de la colonia y varias misiones. Fuente: NASA/JPL-Caltech

## 4.4 Diseño

En este apartado se determina el diseño de la colonia humana compuesta por seis habitantes en Marte. Para ello, se analizan diferentes diseños encontrados en estudios anteriores y se determina el diseño general tomando las ideas más interesantes. Finalmente, una vez tomado el diseño general se determina el tamaño; el sistema de climatización; los sistemas de abastecimiento de alimentos, agua y aire respirable; una estación ambiental que recoja datos a lo largo del tiempo; y por último, los sistemas de comunicaciones.

### 4.4.1 Líneas generales

En primer lugar, resulta interesante analizar una estructura de tipo hinchable para nuestra colonia, ya que este tipo de estructura ha sido el elegido en el primer estudio de una misión tripulada a Marte, “a gran escala” de Von Braun, y en el proyecto más reciente a día 22 de junio de 2014, Mars One. Utilizar este tipo de estructura permite reducir el peso y el espacio ocupado durante el viaje, aunque finalmente se descarta por motivos de aislamiento térmico y de robustez de la estructura, como puede verse analizado en el siguiente párrafo.

En caso de instalar estructuras hinchables habría mucha transferencia de calor entre la fría atmósfera marciana y el interior de la colonia. Una posible solución sería una estructura formada por diferentes capas de aire, pero se encuentra el problema de que el aire tiende a moverse por las diferencias de temperatura, permitiendo una transferencia de calor mediante convección muy superior en comparación a la que existiría únicamente por conducción, donde la conductividad térmica del aire es muy baja. Respecto a la estabilidad y robustez de la estructura, existe un gran desconocimiento del suelo marciano por la falta de excavaciones realizadas hasta la fecha, por lo que no se puede asegurar una fijación al suelo estable. A pesar de no existir muchos datos, sí se puede afirmar que la estructura no estaría sometida a cargas elevadas porque en la superficie marciana la velocidad del viento alcanza hasta 108 km/h durante las tormentas de arena pero con una densidad de  $0,02 \text{ kg/m}^3$ , menor al 2% de la densidad del aire atmosférico terrestre, lo que equivaldría a un viento terrestre de 14 km/h. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se concluye con que la mayor dificultad de esta estructura sería el aislamiento térmico, teniendo también presente la fijación de ésta en el suelo.

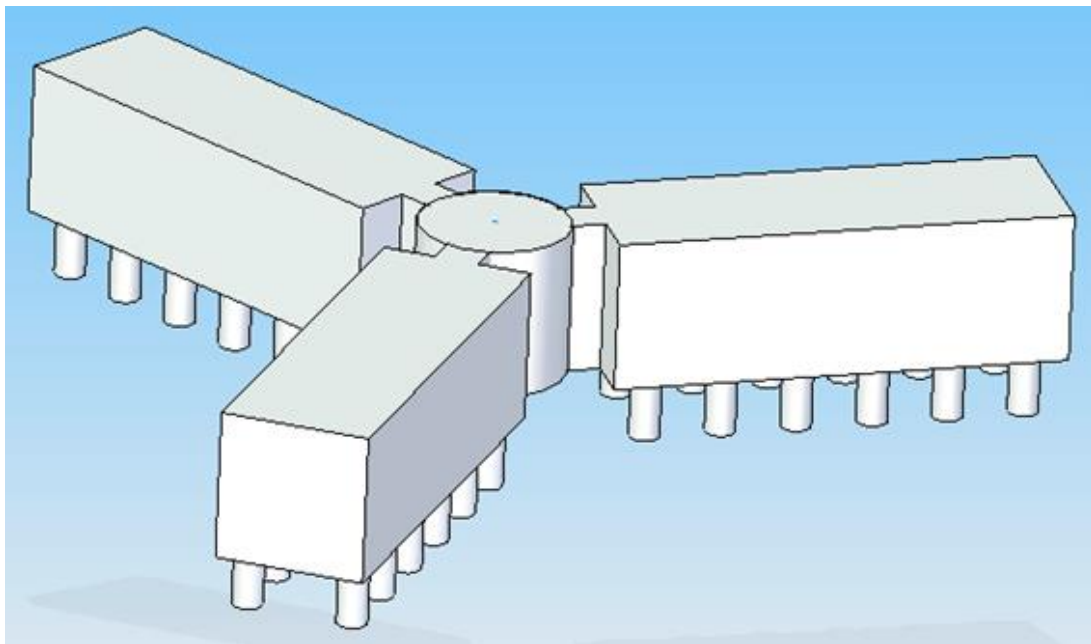
Debido a la baja temperatura exterior y a la radiación, hay que dotar a la estructura con capacidad de aislamiento térmico y aislamiento frente a la radiación. Para lograr estos objetivos imprescindibles para la supervivencia de los habitantes de la colonia, la composición de las paredes está formada por aislante térmico principalmente, con una estructura ligera de aluminio que hace las funciones de soporte estructural. Además, es necesario un blindaje contra la radiación proporcionado por métodos como un recubrimiento de arena marciana, utilizado en el proyecto Mars One,



aunque éste se ha descartado por la posibilidad de que esta capa de arena se vea reducida si fuera arrastrada por el viento; un toldo que haga de escudo o añadiendo a la estructura de las paredes una capa de material aislante. Debido a que un blindaje tipo toldo no aísla térmicamente y un blindaje a modo de una nueva capa en las paredes aportaría mayor resistencia térmica, cumpliendo con la función de aislante, no se considera el material del blindaje para el cálculo de las cargas térmicas.

Finalmente, se ha tomado la decisión de basar el diseño de la colonia en las bases polares existentes en la Tierra, concretamente en la Base Antártica Española Juan Carlos I (ver Figura 4.8).

La Base Antártica Española Juan Carlos I está situada en la Isla Livingston, fue inaugurada en el año 1988 y ha sido renovada recientemente después del concurso de proyectos convocado en el año 2007 donde resultó ganador el proyecto del arquitecto británico Hugh Broughton. Situada en la Antártida, está en un lugar donde pueden alcanzarse temperaturas del orden de la existente en la superficie marciana en la ubicación de la colonia, ya que se trata de una zona terrestre con un clima muy extremo donde la temperatura puede descender hasta  $-80^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.8** Diseño de la colonia en líneas generales. Fuente: Elaboración propia

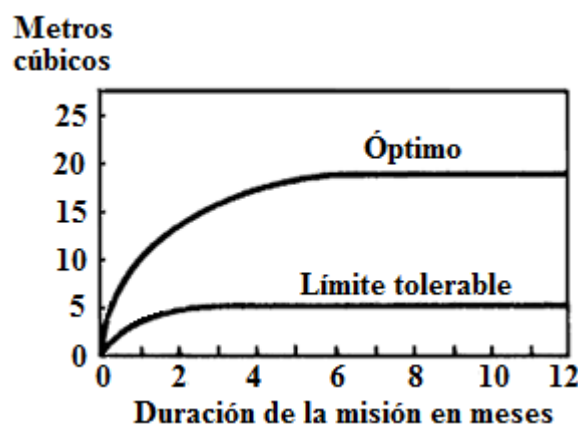
Desde el punto de vista de la seguridad, es muy interesante que la colonia esté formada por tres módulos, ya que, la posibilidad de aislar las diferentes partes de la colonia reduce el riesgo de la tripulación en caso de algún problema localizado, como una despresurización, o accidentes puntuales como el un impacto de un meteorito o un incendio. Además, otra ventaja del diseño de la Base Antártica Española Juan Carlos I es que está unida al suelo mediante pilares hidráulicos que sirven para nivelarla horizontalmente, lo que permite a la colonia ser instalada sin necesidad de un terreno completamente horizontal.

Debido al elevado volumen de la colonia, se realiza el viaje a Marte con los diferentes módulos desmontados para proceder a su montaje en la zona fijada en el apartado 4.3 Ubicación. Debido a su forma rectangular, se podría pensar en su transporte ya montados en una nave cilíndrica, dejando por hacer únicamente la labor de unir los módulos entre ellos y a los sistemas de aprovisionamiento de energía. Por otro lado, los tres módulos están unidos mediante una estancia común de forma cilíndrica, que debe ser transportada ya montada desde la Tierra, estando fuertemente aislada frente a la radiación y pudiendo ser utilizada en el viaje hasta el planeta rojo como estancia protectora, además de poder ejercer las funciones de modulo habitacional en Marte hasta terminar el montaje de todos los sistemas básicos y en periodos donde la radiación sea inusualmente alta por eventos como llamaradas solares.

#### 4.4.2 Dimensiones

Para determinar las dimensiones de la colonia se ha tomado la decisión de superar el mínimo espacio habitable recomendado por la NASA y basarnos en el espacio disponible en la Estación Espacial Internacional para una tripulación formada por un máximo de seis personas

El mínimo espacio habitable requerido por la NASA es de 5 m<sup>3</sup>/habitante para misiones de 12 meses de duración, mientras que el óptimo está establecido en 19 m<sup>3</sup>/habitante (ver Figura 4.9).

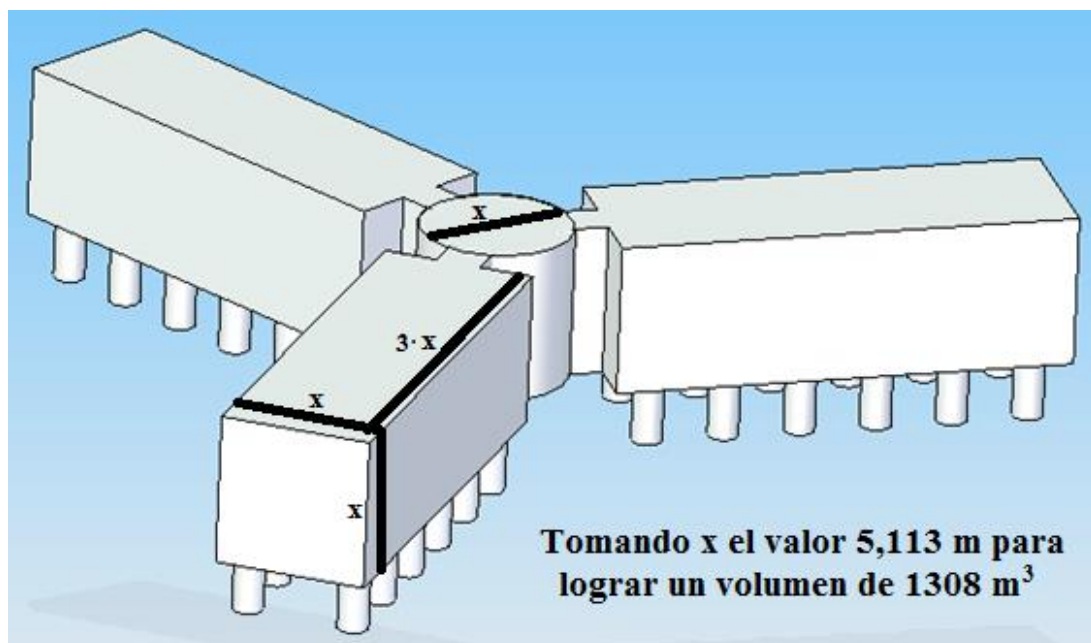


**Figura 4.9** Volumen total del módulo por habitante. Fuente: NASA

Debido a que las misiones de la NASA cuentan con el retorno de los tripulantes a la Tierra pero en este caso se trata de una colonia permanente, este espacio habitable debe ser ampliamente superado para comodidad de los habitantes. Para ello, se ha analizado el espacio habitable en estudios anteriores, siendo de 28,375 m<sup>3</sup>/persona en la misión Mars Direct y de 64,67 m<sup>3</sup>/persona en la Estación Espacial Internacional, con un espacio habitable total de 388 m<sup>3</sup> para una tripulación formada por un máximo de seis tripulantes. Además de este espacio habitable, la Estación Espacial Internacional cuenta con un espacio presurizado de 528 m<sup>3</sup> no habitables.

Finalmente, debido a que se trata de una colonia permanente, se toma la decisión de conservar los  $528 \text{ m}^3$  no habitables, donde se ubican equipos científicos y tecnológicos, pero además, doblar el espacio habitable por persona para mejorar la comodidad y convivencia de los habitantes. Por tanto, el espacio habitable es de  $130 \text{ m}^3/\text{persona}$ , que para 6 habitantes da lugar a una colonia de  $780 \text{ m}^3$ , que unido a los  $528 \text{ m}^3$  no habitables hacen un espacio total de  $1308 \text{ m}^3$ .

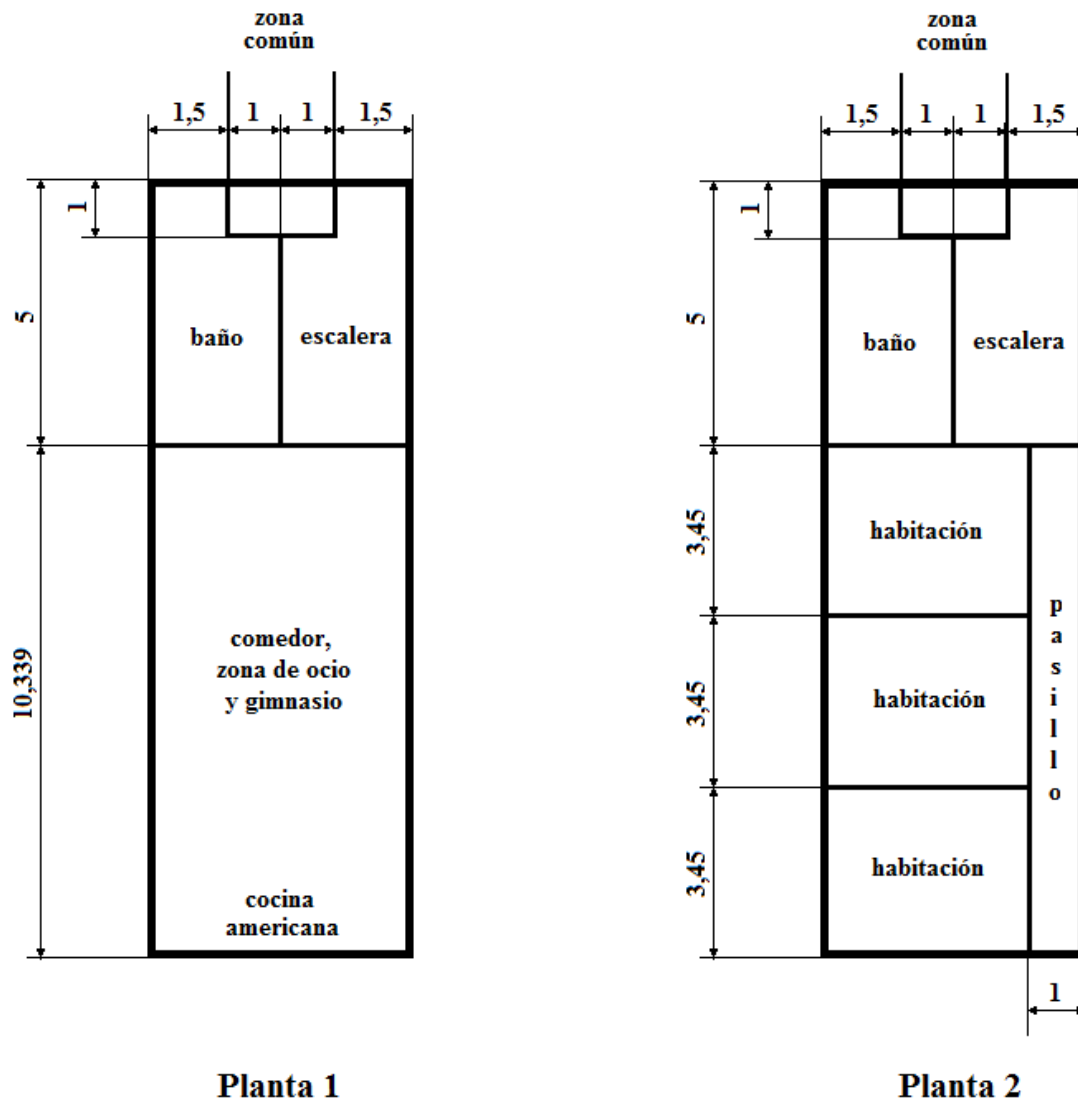
Para determinar las dimensiones de la colonia de modo que se consiga un volumen de  $1308 \text{ m}^3$ , se calcula el volumen de la zona común como un cilindro y el de los tres módulos como prismas rectangulares. Con lo que se determinan las dimensiones que muestran en la Figura 4.10, permitiendo dos plantas por módulo gracias a la altura de  $5,113 \text{ m}$ , lo que da lugar a una superficie total de  $511,64 \text{ m}^2$  con  $255,82 \text{ m}^2$  por planta.



**Figura 4.10** Dimensiones de la colonia. Fuente: Elaboración propia

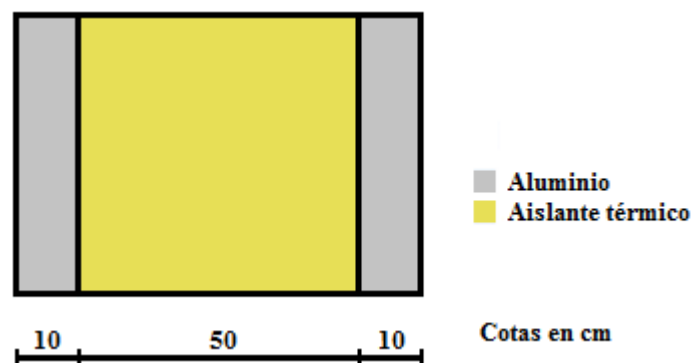
Desde el punto de vista de la seguridad, como se ha comentado anteriormente, es muy interesante que la colonia esté formada por tres módulos que permitan aislar las diferentes partes de la colonia en caso de algún problema localizado. Por tanto, la colonia está formada por una zona común que une los tres módulos, un módulo no habitable destinado a equipos científicos y tecnológicos con un volumen de  $401 \text{ m}^3$  y dos módulos habitables gemelos con la distribución que puede verse en la Figura 4.11.





**Figura 4.11** Distribución de las estancias de la colonia. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tras determinar las dimensiones de la colonia, se establece la composición de los muros formados por aislante térmico principalmente y una estructura ligera de aluminio que hace las funciones de soporte estructural como se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12** Composición de los muros de la colonia. Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3 Climatización

En este apartado se determina el sistema de climatización necesario para mantener la colonia a 22 °C, para ello, previamente se calcula la carga térmica de la misma.

##### 4.4.3.1 Cargas térmicas

La carga térmica de la colonia es de 13081,29 W, obtenida después de aplicar un coeficiente de seguridad de 3 a la carga térmica total de 4360,43 W, ya que la temperatura puede ser inferior a la media durante la noche y además dotar al sistema con la capacidad de poder calentar la colonia y no solo mantener el equilibrio térmico. Esta carga térmica se calcula como la suma de las cargas térmicas por transmisión térmica, por iluminación, por los habitantes, por cargas externas, por cargas internas, por ventilación, por infiltración y por el suministro de agua debido a que se introduce del exterior a -63 °C. Todas estas cargas, mostradas en la Tabla 4.4, se detallan a continuación.

Carga térmica [W]	
Por transmisión térmica	5564,95
Por iluminación	-810,10
Por 6 personas	-600,00
Por cargas externas	0,00
Por cargas internas	-1,02
Ventilación	0,00
Infiltración	0,00
Agua	206,60
Carga térmica total	4360,43

**Tabla 4.4** Cargas térmicas de la colonia. Fuente: Elaboración propia

- Por transmisión térmica

Se debe a la transmisión de calor que tiene lugar desde el interior de la colonia a 22 °C hacia el exterior, a una media de -63 °C. A pesar de existir una gran diferencia de temperatura, el consumo energético no es muy elevado, ya que la colonia tiene fuentes que aportan calor continuamente, como la iluminación o el calor corporal de las personas, y el calor perdido por transferencia térmica es de 5564,95 W como se determina en el Anexo A. Esto se debe a que la colonia está formada por muros con 50 cm de aislante térmico y la atmósfera marciana a pesar de estar muy fría tiene una densidad de 0,02 kg/m<sup>3</sup> y una presión inferior a 10 mbar, por lo que la colonia se asemeja más a un termo hermético y en condiciones exteriores de vacío que a una vivienda tal y como las conocemos en la Tierra.

- Por iluminación

Se debe al calor desprendido por las bombillas, por lo que aporta calor a la colonia y debe restarse en el cálculo de la carga térmica total. Está establecida en  $20 \text{ W/m}^2$  pero se consigue reducir a  $3,17 \text{ W/m}^2$  mediante el uso de bombillas LED de bajo consumo de Philips, las cuales aportan una iluminación equivalente a 60 W con un consumo eléctrico de 9,5 W, como puede verse en la ficha técnica del fabricante (ver Figura 4.13).



**LED Bombilla**  
9,5 W (60 W), Casquillo E27, Blanca cálida | 8718291193029 [Productos similares](#)

**Valores nominales**

Potencia nominal: 9.5.0 W

Flujo luminoso nominal: 806 lm

Vida útil especificada: 15.000 hora(s)

Ángulo de apertura nominal: 150 grado

**Características de la bombilla**

Forma: Estándar

Casquillo: E27

Voltaje: 220 - 240 V

Regulable: No

**Consumo de energía**

Vataje: 9,5 W

Equivalencia en vatios: 60 W

Etiqueta de bajo consumo: A+

Consumo de energía por 1000 horas: 9,5 kW·h

**Figura 4.13** Ficha técnica bombilla LED de Philips. Fuente: Philips

A pesar de tratarse de bombillas de larga duración alcanzando hasta 15000 horas de funcionamiento, esta duración se corresponde con 1,7 años terrestres si estuviesen continuamente encendidas, por lo que a pesar de no ser un caso real, hay que llevar repuestos de bombillas desde el inicio de la misión o aprovechando los viajes que tienen que realizar las naves de carga Dragon de SpaceX para el aprovisionamiento de alimentos (ver apartado 4.4.4.1 Abastecimiento de alimentos).

- Habitantes

Se debe al calor corporal desprendido por las personas, por lo que aporta calor a la colonia y debe restarse en el cálculo de la carga térmica total. Está establecido en  $100 \text{ W/m}^2$  y por tanto se determina en  $600 \text{ W}$  debido a que la tripulación está formada por seis habitantes.

- Cargas externas

Se debe al calor aportado por la radiación solar incidente por lo que ayuda a calentar la colonia y debe restarse en el cálculo de la carga térmica total. Debido a que una de las posibilidades para aislarla de la radiación es instalar un toldo, lo que aislaría a la colonia de este aporte de energía térmica, se toma la decisión de despreciar esta carga térmica, ya que es la opción más desfavorable.

- Cargas internas

Se debe al calor desprendido por equipos como ordenadores, monitores, transformadores o sistemas de comunicación, por lo que aporta calor a la colonia y debe restarse en el cálculo de la carga térmica total. Debido a que no se conocen todos los aparatos eléctricos instalados en la colonia, se toma únicamente el consumo de energía conocido, siendo de  $1,02 \text{ W}$  debido a la estación ambiental similar a la instalada en el rover Curiosity.

- Ventilación

Se debe a la renovación del aire del interior, que se encuentra a la temperatura óptima, por aire nuevo. En este caso, la renovación de aire tiene lugar mediante procesos como la obtención de oxígeno del agua mediante electrolisis, por lo que, estando el agua a la temperatura de la colonia, esta carga térmica es despreciable.

- Infiltración

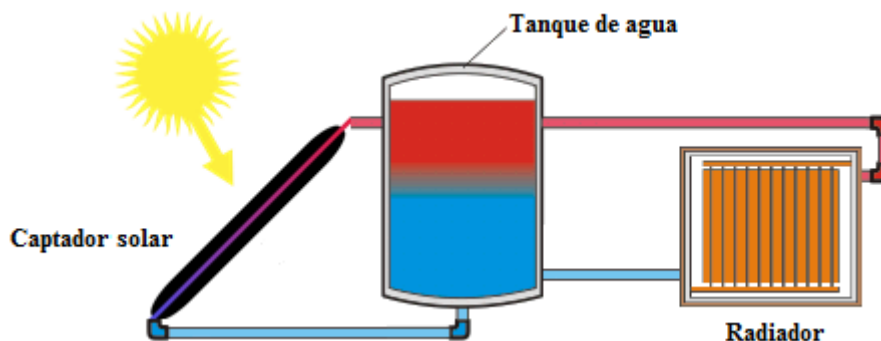
Se debe a fugas del aire de la colonia y entradas del frío aire exterior, por lo que se trata de una carga térmica nula debido a tratarse de un espacio hermético.

- Suministro de agua

Se debe al suministro de agua obtenida mediante ISRU, que se obtiene en Marte y se introduce en la colonia a la temperatura exterior de  $-63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teniendo que calentar el agua, esta carga térmica es de  $206,60 \text{ W}$  a consecuencia de un rendimiento de reciclaje en torno al  $80 \%$  que supone un aporte de  $33 \text{ Kg/día}$  (ver apartado 4.4.4.2 Abastecimiento de agua).

#### 4.4.3.2 Sistema de climatización

Para aportar el calor necesario a la colonia, se determina el sistema de climatización analizando las siguientes opciones: mediante bomba de calor, con la dificultad de la baja temperatura exterior, de  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$  de media, y de transferir calor a la casi inexistente atmósfera con una presión de 6,9 mbar a 9 mbar; bomba de calor geotérmica, con la ventaja de utilizar la inercia térmica del suelo que actúa como sumidero o como fuente de calor, pero con el inconveniente de no poder diseñar el sistema debido al desconocimiento del terreno, donde las mayores excavaciones realizadas alcanzan una profundidad del orden de pocos centímetros; mediante radiador eléctrico, de menor rendimiento que los anteriores pero fiable y operativo en un amplio rango de condiciones; o finalmente, mediante un sistema de calefacción mediante captadores solares como el de la Figura 4.14.



**Figura 4.14** Calefacción mediante colector solar. Fuente: Elaboración propia

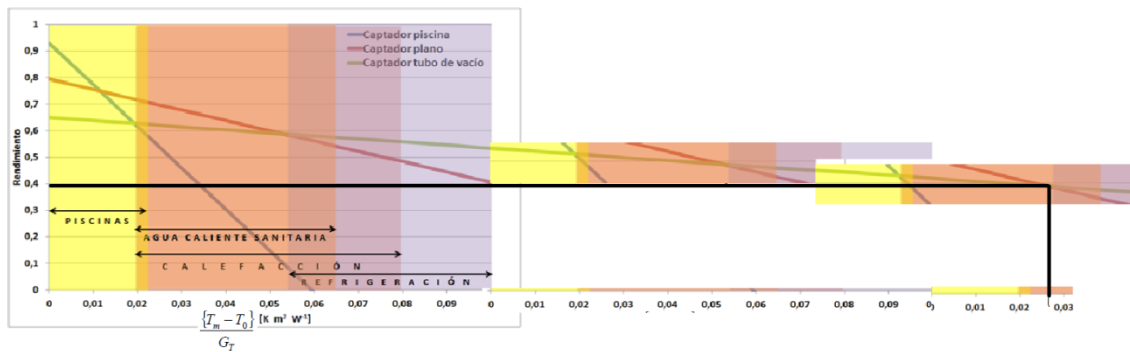
Para estudiar la viabilidad del sistema, se determina el rendimiento aproximado del sistema en función del tipo de captador, de la radiación solar incidente y de la temperatura del fluido y exterior. Tras calcular el parámetro del eje horizontal, queda fuera de la gráfica tomando el valor de 0,226 (ver Figura 4.15) calculado mediante la siguiente expresión:

$$\frac{T_m - T_0}{G_T}$$

Donde:

- $T_m$  es la temperatura del fluido, establecida en  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- $T_0$  es la temperatura exterior, con una media de  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- $G_t$  es la irradiancia solar, determinada en  $589,2\text{ W/m}^2$ .

Por lo que, si se pudiera realizar una interpolación lineal, el rendimiento del captador sería del 39 %, como se muestra en la Figura 4.15.



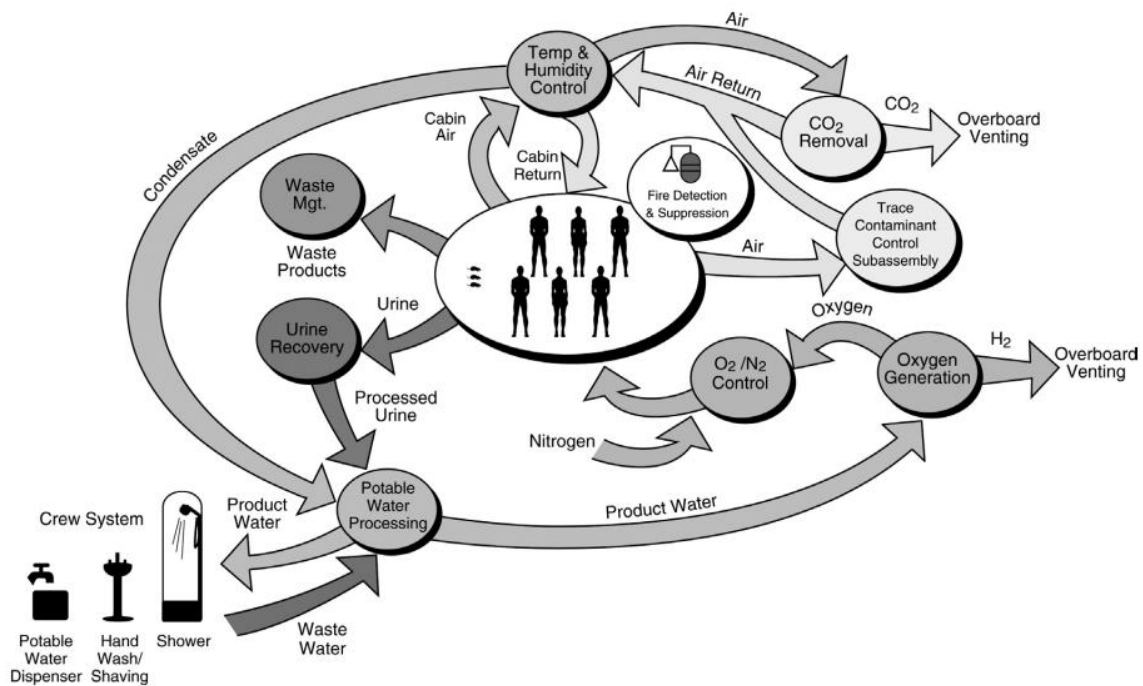
**Figura 4.15** Interpolación para hallar el rendimiento del captador de tipo tubo de vacío. Fuente: Elaboración propia

Es interesante el sistema de calefacción mediante captadores solares pero debido a las dificultades encontradas, se incluye en el apartado 9 Líneas futuras de desarrollo. Finalmente, se determina que el sistema de la colonia esté formado por radiadores eléctricos. Esto se debe a que, a pesar de un menor rendimiento, son capaces de entregar una potencia térmica de 13081,29 W con gran fiabilidad y un rendimiento próximo a la unidad.

#### 4.4.4 Abastecimiento de alimentos, agua y aire respirable

En este apartado se determinan los sistemas que abastecen a la colonia de necesidades básicas de alimentación, agua y aire respirable: así como su consumo energético basado en un sistema ECLSS (Environmental Control and Life Support System) como el existente en la Estación Espacial Internacional mostrado en la Figura 4.16, el cual realiza las siguientes funciones:

- Gestión de la atmósfera: Acondicionamiento, servicios de emergencia, monitorización y mantenimiento de la presión.
- Gestión del agua: gestión de agua potable, de agua usada y su monitorización.
- Gestión de los residuos sólidos: gestión de la basura y los residuos metabólicos.



**Figura 4.16** Esquema de funcionamiento del ECLSS. Fuente: NASA/JPL-Caltech

En el caso del estudio de la misión Mars or Bust, se estima el consumo de los diferentes subsistemas diferenciados en: comida, donde el consumo energético se debe a un microondas, un frigorífico y al fregadero; agua, el cual consume energía principalmente por el sistema de evaporación de aire, destilación por compresión de vapor y ósmosis inversa y ultrafiltración; atmósfera, donde la mayor parte de energía se consume para realizar la electrolisis del agua y el resto en un intercambiador de calor, un concentrador electroquímico despolarizado y sistemas de control y detección de incendios; y finalmente, residuos, donde se consume energía debido al tratamiento de residuos sólidos y fecales.

Finalmente, para determinar la energía necesaria para abastecer al sistema, se muestra en la Tabla 4.5 el consumo estimado de cada subsistema en el estudio de la misión Mars or Bust, donde en la Tabla 4.6 se restan los 820 W del intercambiador de calor al subsistema de la atmósfera, ya que en nuestro caso las cargas térmicas de la colonia son de 6541 W pero ya se han incluido en el apartado 4.4.3 Climatización.

Subsistema	Consumo [W]
Comida	4180
Agua	2211
Atmósfera	3886
Residuos	363
Total	10640

**Tabla 4.5** Consumo del ECLSS y sus subsistemas en la misión Mars or Bust. Fuente: Informe Mars or Bust

Subsistema	Consumo [W]
Comida	4180
Agua	2211
Atmósfera	3066
Residuos	363
Total	9820

**Tabla 4.6** Consumo de los diferentes subsistemas del ECLSS de nuestra colonia. Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4.1 Abastecimiento de alimentos

Se determina el consumo de comida deshidratada en 1,77 kg/día·persona, ya que es la cantidad suministrada a la Estación Espacial Internacional según la ESA, donde se requiere un gasto de agua de 0,8 kg/día·persona para hidratar esta comida.

Debido a que la colonia está formada por seis habitantes, el consumo de comida es de 10,62 kg/día y el de agua para hidratarla es de 4,8 kg/día, lo que supone un gasto de 3876,3 kg de comida deshidratada o lo que es lo mismo, 5628,3 kg de comida hidratada por año terrestre.

En el apartado de Biocombustibles se ha comentado que la materia orgánica generada por los propios habitantes de la colonia se puede usar como abono para una posible plantación incluida en el capítulo 9 Líneas futuras de desarrollo, la cual permitiría a los habitantes obtener comida fresca y forma parte del diseño de la colonia del proyecto Mars One bajo el nombre “plant production unit”.

La compañía Green Sense Farms (GSF), especialista en cultivos en interiores, está investigando con ayuda de Philips sobre optimizar luces LED en función del cultivo, modificando parámetros como la intensidad y longitud de onda de la luz más adecuada para cada planta, con el fin de realizar cultivos verticales en edificios para tener vegetales frescos durante todo el año en zonas muy pobladas, resultando de gran utilidad para realizar cultivos en Marte, ya que las plantas morirían a causa de la radiación ionizante que recibirían en caso de estar directamente expuestas a la radiación solar.

Finalmente, debido a la falta de conocimiento sobre cultivos en Marte, se puede utilizar la colonia para investigar en este campo. Para tener un suministro fiable de alimentos se establece el envío de naves de carga, como la Dragon de la empresa SpaceX, con comida deshidratada.

Debido a que las órbitas de los planetas son elípticas, están en diferente plano orbital y los planetas giran a diferente velocidad angular respecto al Sol, la energía requerida para realizar el viaje desde la Tierra hasta Marte es diferente en cada momento. Siendo mínima en un periodo que se da cada dos años, cuando es posible



realizar la trayectoria de mínima energía entre estas dos órbitas elípticas, denominada órbita de transferencia de Hohmann en honor a Walter Hohmann, quien la propuso en 1925.

Finalmente, con el consumo de alimentos determinado en 3876,3 kg por año terrestre, unido a que es posible realizar viajes de mínima energía cada dos años con las naves Dragon de 6000 kg de capacidad máxima, se establece un viaje de dos naves cargadas con 7752,6 kg de comida deshidratada cada dos años, quedando disponibles 4247,4 kg de capacidad para enviar otras cargas cada periodo de dos años.

#### 4.4.4.2 Abastecimiento de agua

Para determinar la cantidad de agua que hay que suministrar a la colonia, se muestra en la Tabla 4.7 el consumo total por persona y día terrestre desglosado por cada actividad, siendo el consumo total de la colonia 165 kg/día teniendo en cuenta que la colonia está formada por seis habitantes.

Actividad	Consumo de agua [kg/día·persona]
Beber	1,3
Hidratar la comida	0,8
Higiene personal	7,5
Lavar platos	5,4
Lavar la ropa	12,5
Total	27,5

**Tabla 4.7** Consumo de agua en la colonia. Fuente: ESA

De acuerdo al reciclaje del agua realizado por el sistema ECLSS, cuya eficacia de reciclaje se sitúa en torno al 80 %, hay que asegurar el 100 % de consumo de agua del primer día y después obtener mediante ISRU 33 kg de agua al día, debido al 20 % de consumo diario que no es posible reciclar.

Mediante ISRU se consigue agua mediante dos sistemas independientes, ya que es posible obtener agua del vapor atmosférico y del hielo en la superficie, aportando esta duplicidad mayor seguridad en el suministro de agua. Los primeros estudios a cerca de obtener agua en Marte se realizaron por la NASA gracias a los datos obtenidos en la misión Viking.

Respecto a la obtención del vapor atmosférico, la Universidad de Washington diseñó el sistema WAVAR (Water Vapor Adsorption Reactor) para proporcionar agua a un sistema de soporte de vida en la Design Reference Mission. El funcionamiento del sistema consiste en extraer el vapor de la atmósfera marciana mediante adsorción en una cámara con zeolita 3A, seguidamente, cuando esté cerca de la saturación, el agua es retirada mediante microondas que la calientan hasta licuarla para terminar almacenándola en forma de hielo. Cabe destacar que el WAVAR se diseñó según los

datos obtenidos en la misión Viking, donde se determinó una concentración de vapor de agua bastante constante a lo largo del año y de media  $2 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ .

Además, se realizaron simulaciones en el lugar de aterrizaje de Viking 1 considerando fluctuaciones de temperatura y velocidades del viento en función de las franjas horarias diarias durante 333 días marcianos porque no hay datos precisos de temperatura para el año completo, obteniendo los siguientes resultados. De estas simulaciones se obtienen al menos 2,28 kg de agua por día terrestre con un consumo energético de hasta 8,4 kW. Por tanto, para obtener los 33 kg de agua diarios se precisa de 15 sistemas de este tipo que aportan 34,2 kg/día con un consumo energético de hasta 126 kW, muy superior a los 36 kW de consumo de la colonia.

Por otro lado, la sonda Phoenix descubrió la presencia de hielo en el suelo marciano, confirmado recientemente por el instrumento SAM instalado en el Curiosity, el cual determinó que un 2% de la composición del suelo marciano está formado por agua, muy superior a la concentración de agua en la atmósfera en forma de vapor. Por ello, la Universidad de Texas realizó un diseño conceptual de un rover capaz de recoger tierra de la superficie marciana y calentarla mediante microondas para obtener el agua de manera similar a la del WAVAR.

Debido al elevado consumo energético de estos sistemas y la necesidad de desplazamiento del sistema que obtiene el agua del suelo marciano, sería muy interesante desarrollar un sistema de abastecimiento energético capaz de aportar energía con independencia a la colonia (ver apartado 9 Líneas futuras de desarrollo).

#### **4.4.4.3 Abastecimiento de aire respirable**

Como se ha comentado en el apartado 2.2 Diferencias con la Tierra, la atmósfera marciana está formada por más de un 95 % de dióxido de carbono, menos del 2 % de argón, menos del 2% de nitrógeno y un porcentaje menor al 1 % de otros gases, donde se incluye el oxígeno imprescindible para la respiración humana.

Por este motivo, además de la baja presión y temperatura, es necesario instalar en la colonia un sistema de control como el ECLSS (Environmental Control and Life Support System) al igual que en la Estación Espacial Internacional o en el estudio de la misión Mars or Bust, donde se consigue generar oxígeno a partir de la electrolisis del agua, eliminar el  $\text{CO}_2$ , detectar incendios y calentar el aire mediante un intercambiador de calor, aunque esto último se realiza en nuestra colonia mediante el sistema de climatización descrito en el apartado 4.4.3 Climatización. Por lo que, considerando en otro apartado los 6541 W debidos a climatización, se fija el consumo total del sistema en la Tabla 4.6.

#### 4.4.5 Estación ambiental

Debido al desconocimiento del clima marciano con detalle en las diferentes zonas del planeta, se instala una estación ambiental en la colonia que permite tanto investigar sobre la propia superficie marciana, como facilitar el estudio de futuras colonias en ubicaciones próximas, aportando datos útiles de las condiciones presentes en Marte y su variación a lo largo del año o incluso del día. Con ello, se consigue determinar parámetros como la velocidad del viento y la radiación solar incidente en cada momento para diseñar con más precisión los sistemas de generación de energía eólica y solar respectivamente, la temperatura y su variación a lo largo del año para determinar con mayor precisión sistemas de climatización, o incluso, realizar excavaciones más profundas a las que se han realizado hasta el momento, permitiendo estudiar el uso de energía geotérmica para climatizar la colonia con menor consumo de energía eléctrica. Debido a que el instrumento REMS instalado en el rover Curiosity realiza multitud de medidas útiles para realizar el estudio de una colonia humana en Marte, se instala un sistema similar, pero que además de las funciones de este instrumento descritas en el apartado 3.1 Misiones no tripuladas, permita realizar mediciones de radiación, como el instrumento RAD, y excavaciones profundas para estudiar el uso de energía geotérmica en la superficie marciana.

Por este motivo, se determina que el consumo debido a la toma de datos de la estación ambiental, es ligeramente superior a los 25 W·h/día marciano que necesita el instrumento REMS del Curiosity, donde se alcanzas picos de 9W de potencia y el consumo medio es en torno a 4 o 5 veces la energía requerida por un Smartphone actual.

#### 4.4.6 Comunicaciones

Un buen sistema de comunicaciones es necesario para mantener el contacto entre los habitantes de la colonia marciana y la Tierra en todo momento; permitiendo contactar con psicólogos, personas conocidas, compañeros de trabajo y la transmisión de datos que permite conocer más a fondo el planeta rojo.

Para lograr este objetivo, varias sondas orbitadoras enviadas a Marte se utilizan también como repetidores de comunicaciones, como en la misión Mars Odyssey. Con este sistema se han alcanzado velocidades de descarga de datos de 21,33 kbps en la misión Mars Global Surveyor en 1996, mientras que actualmente, en la misión Yinghuo-1 de 2011 surgió un problema durante el lanzamiento que imposibilitó dejar la órbita terrestre y realizar la misión; pero se pretendía establecer comunicación entre Marte y la Tierra alcanzando una velocidad de transmisión de datos de hasta 16 Kb/s. Por tanto, al nivel de tecnología actual es posible alcanzar esta velocidad de transmisión.

Para recibir en todo momento la señal de Marte, la NASA utiliza una red de comunicaciones llamada Deep Space Network (Red de Espacio Profundo), que

gestionada por el JPL (Jet Propulsion Laboratory), constituye el mayor sistema de telecomunicaciones para aplicaciones científicas del mundo. Está formada por tres diferentes complejos en España, Australia y EE.UU, con el fin de estar separados unos  $120^\circ$  de longitud para formar una red de comunicaciones capaz de mantener el contacto en cualquier momento, independientemente del giro terrestre que implicaría la interposición de la Tierra entre ambos puntos de comunicación.

Además del sistema utilizado por la NASA, para mantener el contacto cuando el Sol se interpone entre Marte y la Tierra, se incluye, al igual que en el proyecto Mars One, un satélite de comunicaciones que orbita alrededor del Sol en la misma órbita que la Tierra pero retrasado  $60^\circ$ , con lo que se consigue mantener en todo momento una red de comunicación entre ambos planetas.

Finalmente, para determinar el consumo de energía que suponen las comunicaciones a la colonia, se sabe que es de 25 W entre toma de datos y comunicaciones en la misión Mars Polar Lander, realizada por la NASA en 1999. Pero para tener total seguridad de poder abastecer energéticamente al sistema de comunicaciones, se toma el valor de 125 W, porque es la potencia del generador termoeléctrico instalado en el rover Curiosity, que posee multitud de sistemas actuales con un sistema de comunicaciones entre ellos.

# Capítulo 5

---

## Energía requerida

## 5 Energía requerida

En este apartado se determina la energía requerida para el correcto funcionamiento de todos los sistemas de la colonia, establecida en 35755,86 W tras aplicar un coeficiente de seguridad de 1,5 al consumo real de 23837,24 W; lo que garantiza mayor seguridad en el abastecimiento de este consumo real calculado como la suma de 13081,29 W de climatización, 9820 W debido al abastecimiento de alimentos, agua y aire, 810,95 W debido a la iluminación y 125 W debido a la estación ambiental y el sistema de comunicación con la Tierra.

### 5.1 Climatización

La potencia eléctrica necesaria para climatización es de 13081,29 W debido a que se utilizan radiadores eléctricos con un rendimiento próximo a la unidad y, por tanto, se corresponde aproximadamente con la carga térmica de la colonia. Ésta se obtiene aplicando un coeficiente de seguridad de 3 a la carga térmica de 4360,43 W (ver apartado 4.4.3.1 Cargas térmicas), ya que la temperatura puede ser inferior a la media durante la noche y para dotar al sistema con la capacidad de poder calentar la colonia y no solo mantener el equilibrio térmico.

### 5.2 Abastecimiento de alimentos, agua y aire respirable

El consumo energético debido al abastecimiento de necesidades básicas como comer, beber y respirar, se determina en 9820 W, como se muestra en la Tabla 4.6 debido al ECLSS que posee los siguientes subsistemas: comida, donde el consumo energético se debe a un microondas, un frigorífico y al fregadero; agua, el cual consume energía principalmente por el sistema de evaporación de agua, destilación por compresión de vapor y ósmosis inversa y ultrafiltración; atmósfera, donde la mayor parte de energía se consume para realizar la electrolisis del agua y el resto en un intercambiador de calor, un concentrador electroquímico despolarizado y sistemas de control y detección de incendios; y finalmente, residuos, donde se consume energía debido al tratamiento de residuos sólidos y fecales.

En este apartado, se determina el abastecimiento de alimentos mediante comida deshidratada, que no precisa de consumo energético, sino que se realizan envíos desde la Tierra; el consumo debido al abastecimiento de agua, que se determina como nulo debido a que el consumo de energía por aumentar la temperatura desde los -63 °C del exterior hasta los 22 °C de la colonia se contabiliza en el apartado 4.4.3.1 Cargas térmicas, y por otro lado, los sistemas de captación del vapor atmosférico y obtención de hielo del suelo marciano tienen subsistemas de abastecimiento de energía independientes a la colonia; y por último, el consumo del sistema de abastecimiento de aire respirable, que se toma como los 3066 W de consumo del subsistema de la atmósfera del ECLSS tras restar los 820 W del intercambiador de calor, ya que en

nuestro caso las cargas térmicas de la colonia son de 6541 W pero se han incluido en el apartado 4.4.3 Climatización.

### **5.3 Iluminación**

Se determina en 810,95 W tras aplicar un coeficiente de utilización estimado en 0,5 debido a que no estará toda la iluminación disponible constantemente encendida. Este consumo de todas las luces funcionando simultáneamente es de 1621,9 W, ya que la colonia tiene 511,64 m<sup>2</sup> de superficie entre ambas plantas y como se determina en el apartado 4.4.3.1 Cargas térmicas, el consumo debido a una iluminación es de solo 3,17 W/m<sup>2</sup> gracias a las bombillas LED de bajo consumo de Philips descritas en el mismo apartado.

### **5.4 Estación ambiental y comunicaciones**

El consumo debido a la toma de datos y comunicaciones se estima en 125 W como se muestra en el apartado 4.4.5 Estación ambiental y en el apartado 4.4.6 Comunicaciones.

Esta estimación se realiza en de acuerdo al consumo del generador termoeléctrico alimentado por radioisótopos del rover Curiosity, tratándose de una estimación a la alza para tener la certeza de lograr abastecer energéticamente ambos sistemas, ya que este generador de 125 W alimenta a multitud de instrumentos científicos, incluyendo la estación ambiental, el sistema de comunicaciones y además, los sistemas que dotan de capacidad de movimiento y las herramientas de adquisición de muestras; siendo la instrumentación científica más sofisticada que se ha enviado a Marte desde su lanzamiento y un equipamiento muy interesante para realizar investigaciones científicas en la colonia.

# Capítulo 6

---

## Fuentes de energía renovable



## 6 Fuentes de energía renovable

La energía se denomina renovable si procede de fuentes de energía que no se agotan con su explotación, esto se debe a que se aprovechan flujos de energía que se reponen constantemente de manera natural. Debido a este carácter natural, se trata de energía limpia, donde no se generan subproductos contaminantes por su explotación.

La energía es la capacidad de realizar trabajo y su unidad es el julio (J). No confundir energía y potencia, ya que esta última es el consumo de energía por unidad de tiempo y su unidad es el vatio (W), el cual se define con un ratio de un julio por segundo.

El Sol es el origen de la mayoría de fuentes de energía renovable presentes en la Tierra, recibiendo en la superficie terrestre una cantidad de energía solar unas 9000 veces superior a la energía que se produce actualmente por medio de combustibles fósiles y nucleares. Sin embargo, a pesar de que en Marte el Sol también es una fuente de energía presente y aprovechable, no todas las energías renovables que conocemos en la Tierra pueden ser explotadas allí. Esto se debe a que se aprovechan flujos de energía que se reponen constantemente de manera natural y la naturaleza de ambos planetas tiene notables diferencias.

### 6.1 Biocombustibles

A pesar de generar  $\text{CO}_2$  durante la combustión, se trata de una energía renovable si se consume a un ritmo igual o inferior al que se genera. Por ejemplo, si un bosque es re-plantado al mismo ritmo que se tala, la energía generada por la combustión de esta biomasa se considera renovable. Esto se debe a que el origen de la biomasa está en la fotosíntesis que realizan las plantas aprovechando la energía solar para transformar el agua, el dióxido de carbono y los nutrientes en los carbohidratos que forman la base de moléculas más complejas que se encuentran en biocombustibles como la madera o el etanol, absorbiendo la misma cantidad de  $\text{CO}_2$  durante el crecimiento de las plantas que la que se emite durante su combustión.

Además de realizar la combustión de árboles, residuos forestales o astillas de madera; también se considera biocombustible el metano producido durante la descomposición de materia orgánica, que permite obtener calor y energía mediante su combustión en motores de combustión interna.

Desgraciadamente, debido a la falta de oxígeno en la atmósfera marciana para realizar la combustión y a la inexistencia de organismos vivos en Marte, no es posible realizar la combustión de la biomasa; aunque a pesar de la inexistencia de organismos vivos en Marte, se puede utilizar la materia orgánica generada por los propios habitantes de la colonia, pero en este caso el problema es la falta de oxígeno, permitiéndose la utilización de esta biomasa como abono para una posible plantación.

## 6.2 Energía de las olas

Se trata de una energía renovable debido a que su origen está indirectamente en el Sol, ya que, éste provoca corrientes de aire que generan olas al soplar sobre los mares y océanos.

La generación de energía eléctrica se consigue mediante el uso de generadores que son excitados por el propio movimiento de las olas, por tanto es un tipo de energía que no se puede explotar en Marte debido a la inexistencia de mares y océanos.

## 6.3 Energía mareomotriz

Se trata de una energía renovable que no tiene su origen en la radiación solar, pero se considera renovable debido a que su fuente es la atracción gravitacional de la Luna y una pequeña parte la del Sol.

La energía se obtiene de las corrientes marinas o construyendo una estructura tipo barrera con agujeros por los que pasa el agua cuando sube o baja la marea, siendo ésta la ubicación de las turbinas que mueven generadores de manera similar a lo que sucede en la energía hidráulica.

La central más importante de este tipo se sitúa en La Rance (Francia), con una potencia de 240 MW. Por otro lado, el Reino Unido tiene un emplazamiento potencial en el que se podrían alcanzar los 8600 MW, lo que supone el 5% del consumo eléctrico del país en 2009. A pesar de ello, Marte carece de mares y océanos, lo que imposibilita instalar este tipo de centrales de generación de energía eléctrica.

## 6.4 Energía hidráulica

Se trata de una energía renovable debido a que su origen está indirectamente en la radiación solar. Ésta calienta el agua de los océanos proporcionando la energía necesaria para evaporar el agua y que posteriormente tengan lugar precipitaciones que forman parte del ciclo del agua, pudiendo aprovecharse la energía cinética y potencial del agua que fluye desde las montañas hasta los mares.

Este tipo de energía ha sido aprovechada desde hace siglos en la Tierra con diferentes finalidades, pero resulta imposible de explotar en Marte debido a la inexistencia de corrientes líquidas por la superficie marciana.

## 6.5 Energía geotérmica

Se trata de una energía renovable debido a que se fundamenta en aprovechar el calor interno existente en la Tierra, el cual se considera inagotable debido a que el periodo de explotación hasta agotar el recurso es muy largo. A pesar de ello, este calor puede agotarse localmente en pocos años o décadas en zonas donde se extrae a un ritmo mayor al cual se repone a partir del calor de las profundidades de la Tierra.

Los recursos geotérmicos más útiles se dan cuando es posible aprovechar el calor mediante acuíferos con agua caliente o incluso vapor, permitiendo la generación de electricidad cuando la temperatura es lo suficientemente alta. Otra forma de aprovechar este tipo de energía es utilizar la tecnología conocida como yacimientos secos o roca seca caliente, que consiste en perforar a profundidades considerables para alcanzar las “rocas calientes” e inyectar agua fría para obtener agua caliente utilizando las rocas a modo de intercambiador de calor.

Debido al desconocimiento del subsuelo marciano, no se puede asegurar el aprovechamiento del calor para climatizar directamente o para realizar climatización mediante yacimientos secos utilizando la gran inercia térmica del subsuelo, pues éste a pocos metros de profundidad presenta una temperatura mucho más constante que la atmósfera.

Con el objetivo de utilizar este tipo de energía para calentar la colonia, faltan multitud de datos para la realización del estudio. Tras la llegada del rover Curiosity, se ha afirmado el origen basáltico de los materiales de la superficie y se ha medido por primera vez la temperatura del suelo pero siendo la única fuente de datos que se tiene para realizar el estudio, lo que resulta insuficiente, y por el momento no puede diseñarse correctamente un sistema de este tipo (ver apartado 9 Líneas futuras de desarrollo).

## 6.6 Energía mediante suelo piezoeléctrico

Se trata de una energía renovable debido a que se aprovecha una energía generada de manera natural, sin agotar la fuente ni generar contaminantes por su explotación. Consiste en instalar en el suelo baldosas formadas por un material piezoeléctrico capaz de generar energía eléctrica con las pisadas realizadas.

Un material piezoeléctrico es aquel capaz de producir un voltaje cuando se comprime o se estira, debido a ello, es utilizado en sensores capaces de dar una señal cuando se aplica una fuerza. Además de esta aplicación, se ha comenzado a investigar la manera de utilizar esta característica especial como una energía “verde”.

En la colonia marciana, debido a que siempre serán las mismas personas quienes realicen las pisadas, resulta más interesante la instalación de material piezoeléctrico en el calzado de los habitantes de la colonia, parecido a lo que realiza la empresa SolePower, donde cada pisada hace girar unos pequeños rotores magnéticos

produciendo electricidad, obteniendo la energía suficiente para cargar un Smartphone tras caminar 24 kilómetros. Por contra, debido a la menor gravedad marciana en comparación con la Tierra, se ve directamente reducida esta pequeña cantidad de energía generada. Normalmente, esta cantidad se compensa con aplicaciones con una alta repetición, pero desgraciadamente tampoco tiene lugar si se instala en la colonia ya que no se espera que los habitantes recorran grandes distancias a pie. Por estos motivos, se descarta el uso de esta tecnología pues no aporta mucha energía y da lugar a un sistema de abastecimiento energético más complejo, el cual conviene que sea sencillo y fiable.

## **6.7 Energía eólica**

Se trata de una energía renovable debido a que su origen está indirectamente en el Sol, ya que, éste forma las corrientes de aire gracias a la diferencia de temperatura originada por la diferencia de radiación solar incidente en las diferentes zonas de la Tierra debido a su curvatura e irregularidades.

Una vez generadas estas corrientes de aire, denominadas viento, la energía cinética contenida puede transformarse en formas útiles para las actividades humanas, permitiendo la transformación en energía eléctrica mediante aerogeneradores.

### **6.7.1 Aerogeneradores convencionales**

Los aerogeneradores convencionales, están formados básicamente por un rotor de tres aspas situado en lo alto de una torre soporte donde también se encuentra la góndola con una reductora que une el rotor a un generador eléctrico.

Este tipo de aerogenerador plantea diferentes dificultades. En primer lugar, debido a la gran diferencia entre las propiedades atmosféricas de Marte y de la Tierra, hay que rediseñar el aerogenerador en general, prestando especial atención a los perfiles aerodinámicos de las aspas; en segundo lugar, se une la complicación de realizar labores de mantenimiento y cambio de piezas en caso de avería o desgaste; y, finalmente, con que una velocidad excesiva del viento durante una tormenta de arena supondría detener el aerogenerador para evitar averías, dejando sin suministro de energía a la colonia y poniendo en riesgo la vida sus habitantes.

Por estos motivos, se descarta el uso de este tipo de aerogeneradores y se emplea un novedoso aerogenerador sin aspas ni partes móviles.

### 6.7.2 Aerogeneradores sin aspas

Debido a las complicaciones que se presentan en los aerogeneradores convencionales, se utiliza un novedoso aerogenerador sin aspas que tiene las ventajas de reducir drásticamente el mantenimiento al carecer de piezas móviles para generar electricidad y orientar el aerogenerador en la dirección del viento, evitando el desgaste de las piezas y la necesidad de lubricantes.

Se trata de un aerogenerador comercializado por la empresa DEUTECNO S.L., con forma de bate de béisbol invertido (ver Figura 6.1) que genera electricidad mediante un material piezoeléctrico excitado por la oscilación lateral que genera la calle de torbellinos de Von Kármán en la estela del aerogenerador. Estos torbellinos, entran en resonancia si su frecuencia de desprendimiento está próxima a la frecuencia de vibración estructural del cuerpo, lo que puede destruir puentes como el de Tacoma Narrows en 1940, o puede aprovecharse para generar electricidad como hace este tipo de aerogenerador.



**Figura 6.1** Aerogenerador piezoeléctrico por vorticidad. Fuente: DEUTECNO S.L.

Una calle de torbellinos de Von Kármán, denominados así en honor a Theodore Von Kármán porque lo explicó teóricamente en 1912, es un patrón en el que periódicamente se desprenden torbellinos a ambos lados del cuerpo inmerso en una corriente de fluido estacionaria (ver Figura 6.2). Este fenómeno está gobernado por el número de Reynolds y genera un movimiento oscilatorio en corrientes que podrían parecer estacionarias.



**Figura 6.2** Vórtices de Von Kármán. Fuente: DEUTECNO S.L.

El rango del número de Reynolds para que tengan lugar las calles de vórtices de von Kármán se sitúa entre  $10^2$  y  $10^7$ , siendo el número de Reynolds,  $Re$ , un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para estudiar un flujo. Se trata de una relación entre inercia y viscosidad, dando lugar a que valores muy pequeños indiquen un movimiento lento y viscoso, donde los efectos de la inercia son despreciables; valores moderados indican flujo laminar, con variaciones suaves; y valores altos se relacionan con flujos turbulentos, donde existen fuertes fluctuaciones aleatorias. Para su cálculo se relacionan la densidad, viscosidad, velocidad y longitud característica del flujo mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu}$$

#### Ecuación 6.1

Donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido expresada en  $\text{kg/m}^3$ .
- $D$  es la longitud característica, expresada en m, en el caso de los aerogeneradores sin aspas se corresponde con el diámetro de los mismos.
- $v$  es la velocidad del fluido expresada en m/s.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido expresada en  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ .

Según la empresa constructora, la curva de potencia para estos equipos es muy similar a la de un dispositivo convencional, pero debido al principio de funcionamiento de estos dispositivos, existe la salvedad de que con números de Reynolds fuera del intervalo entre  $3 \cdot 10^5$  y  $3,5 \cdot 10^6$ , su rendimiento se reduce en torno a un 80% o incluso más. Por tanto, es un parámetro que se debe estudiar.

Debido a la influencia de la densidad y viscosidad del aire, para su instalación en atmósferas diferentes a la terrestre es necesario calcular el número de Reynolds con la densidad y viscosidad de éstas. En el caso de la atmósfera marciana, la densidad a nivel superficial es de  $0,020 \text{ kg/m}^3$  y la viscosidad puede hallarse a partir de las propiedades termofísicas del  $\text{CO}_2$ , ya que, este compuesto supone más del 95% de la atmósfera de Marte.

Para determinar la viscosidad es necesario conocer la temperatura y presión, medidas en la misión Viking I y determinadas en 210 K y entre 6,9 mbar y 9 mbar, respectivamente. Se puede ver en la Tabla 6.1, que muestra la viscosidad cinemática del  $\text{CO}_2$  en función de la temperatura y la presión, que interpolando entre 200 K y 220 K para la menor presión representada (0,1 MPa equivalente a 1000 mbar) la viscosidad cinemática del  $\text{CO}_2$  es de  $10,59 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  (equivalente a  $1,059 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$ ), calculado con la siguiente expresión:

$$\mu_{210\text{ K}} = \frac{\mu_{200\text{ K}} + \mu_{220\text{ K}}}{2}$$

## Ecuación 6.2

Donde:

- $\mu_{210\text{ K}}$  es la viscosidad cinemática del  $\text{CO}_2$  para 210 K.
- $\mu_{200\text{ K}}$  es la viscosidad cinemática del  $\text{CO}_2$  para 200 K, su valor es de 10,06  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  (ver Tabla 6.1 Tabla 6.2).
- $\mu_{220\text{ K}}$  es la viscosidad cinemática del  $\text{CO}_2$  para 220 K, su valor es de 11,06  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  (ver Tabla 6.1).

Cabe destacar que el menor valor de presión representado en la tabla es de 1000 mbar frente a los valores entre 6,9 mbar y 9 mbar de la atmósfera marciana. A pesar de ello, se toma el valor de viscosidad cinemática como válido debido a que la presión tiene menor influencia que la temperatura y es el valor más preciso que se puede hallar de la Tabla 6.1.

**Viscosidad cinemática del dióxido de carbono [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]**

$T/\text{K}$ ( $P/\text{MPa}$ )	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
0.1	10.06	11.06	12.07	13.06	14.05	15.02	15.98	16.93	17.87	18.79
0.5		11.12	12.11	13.10	14.09	15.06	16.02	16.96	17.90	18.82
1.0		242.46	12.20	13.18	14.15	15.11	16.07	17.01	17.94	18.86
2.5		245.44	175.03	124.07	14.51	15.41	16.32	17.23	18.13	19.03
5.0		250.36	179.79	129.96	90.41	16.72	17.24	17.95	18.73	19.54
7.5		255.20	184.41	134.85	96.86	60.47	19.78	19.48	19.85	20.44
10.0		259.98	188.91	139.48	102.42	71.13	32.58	22.80	21.8	21.86
12.5		264.70	193.30	143.90	107.27	78.09	51.13	30.10	25.19	24.02
15.0		269.37	197.61	148.15	111.94	83.74	60.11	40.23	30.29	27.05
17.5		273.99	201.85	152.26	116.38	88.64	66.51	48.43	36.47	30.93
20.0		278.57	206.01	156.25	120.07	93.06	71.74	54.76	42.46	35.29
22.5		283.11	210.11	160.14	124.12	97.07	76.29	59.97	47.74	39.71
25.0		287.61	214.16	163.95	127.85	101.08	80.39	64.45	52.36	43.90
27.5			218.16	167.68	131.47	104.66	84.16	68.45	56.47	47.77
30.0			222.11	171.34	134.98	108.29	87.68	72.09	60.18	51.34
35.0			229.90	178.50	141.76	114.88	94.25	78.67	66.76	57.72
40.0			237.54	185.47	148.28	120.65	100.20	84.55	72.56	63.35
45.0			245.07	192.29	154.59	126.81	105.87	90.06	77.85	68.44
50.0			252.50	198.97	160.73	132.55	111.64	95.21	82.77	73.15
55.0			259.84	205.55	166.74	138.12	116.53	100.07	87.45	77.57
60.0			267.11	212.03	172.63	143.55	121.62	104.80	91.94	81.79
65.0			274.30	218.43	178.44	148.87	126.55	109.31	96.15	85.80
70.0			281.43	224.76	184.16	154.10	131.37	113.99	100.27	89.71
75.0			288.51	231.03	189.81	159.25	136.10	118.66	104.31	93.49
80.0			295.53	237.24	195.40	164.34	140.76	122.58	108.38	97.20
85.0			302.51	243.41	200.93	169.37	145.36	126.81	112.39	100.86
90.0			309.45	249.53	206.42	174.35	149.91	130.99	115.92	104.31
95.0			316.35	255.61	211.87	179.28	154.41	135.12	119.88	107.85
100.0			323.21	261.65	217.28	184.18	158.87	139.21	123.72	111.48
125.0				291.42	243.90	208.22	180.75	159.21	142.09	128.34
150.0				320.61	269.97	231.75	202.14	178.75	160.02	144.84
175.0				349.37	295.68	254.98	223.26	198.06	177.73	161.15
200.0				377.80	321.13	277.99	244.22	217.24	195.35	177.38
225.0				405.96	346.37	300.86	265.08	236.35	212.94	193.61
250.0				433.90	371.46	323.62	285.88	255.45	230.53	209.87
275.0				461.64	396.41	346.30	306.64	274.55	248.16	226.19
300.0				489.21	421.26	368.93	327.39	293.67	265.83	242.57

**Tabla 6.1** Viscosidad del dióxido de carbono. Fuente: MIT



Por otro lado, debido a las dificultades existentes en los paneles solares para generar electricidad durante las tormentas de arena, se establece el funcionamiento nominal de los aerogeneradores en las condiciones que se dan durante las tormentas de arena. En estas tormentas tienen lugar velocidades del viento entre 17 y 30 m/s, por lo que se calcula la velocidad media de 23,5 m/s con la siguiente expresión:

$$v_t = \frac{v_{t \min} + v_{t \max}}{2}$$

**Ecuación 6.3**

Donde:

- $v_t$  es la velocidad media durante las tormentas de arena expresada en m/s.
- $v_{t \min}$  es la velocidad mínima durante las tormentas de arena, toma el valor de 17 m/s según la NASA.
- $v_{t \max}$  es la velocidad máxima durante las tormentas de arena, toma el valor de 30 m/s según la NASA.

Seguidamente, con estos valores se calcula el número de Reynolds durante las tormentas de arena para el aerogenerador que se oferta con unas dimensiones de 25 m de altura y 3,125 m de diámetro. El número de Reynolds se calcula con la Ecuación 6.1:

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu}$$

Donde:

- Re es el número de Reynolds.
- $\rho$  es la densidad de la atmósfera marciana, siendo de 0,02 kg/m<sup>3</sup>.
- D es la longitud característica expresada en m, en el caso de los aerogeneradores sin aspas es el diámetro de 3,125 m.
- v es la velocidad del fluido, siendo de 23,5 m/s calculados con la Ecuación 6.3.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, siendo de 1,059·10<sup>-5</sup> Kg/m·s calculados con la Ecuación 6.2.

Finalmente, se obtiene un número de Reynolds de 1,39·10<sup>5</sup>, fuera del rango de funcionamiento establecido entre 3·10<sup>5</sup> y 3,5·10<sup>6</sup>. Debido a las limitaciones impuestas para el correcto funcionamiento del aerogenerador, se calcula un diámetro para que el número de Reynolds se sitúe en la mitad del intervalo (2,05·10<sup>6</sup>) en la atmósfera marciana, este diámetro óptimo se calcula despejando D de la Ecuación 6.1, es decir, mediante la siguiente expresión:



$$D = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot v}$$

**Ecuación 6.4**

Donde:

- D es el diámetro del aerogenerador expresado en m.
- Re es el número de Reynolds, de valor  $2,05 \cdot 10^6$  para un correcto funcionamiento del aerogenerador.
- $\mu$  es la viscosidad cinemática de la atmósfera, que toma el valor de  $1,059 \cdot 10^{-5}$  Kg/m·s (ver Ecuación 6.2).
- $\rho$  es la densidad atmosférica, siendo de  $0,020$  kg/m<sup>3</sup> según la NASA.
- v es la velocidad del fluido, siendo de 23,5 m/s (ver Ecuación 6.3).

Finalmente, se obtiene un diámetro óptimo de 46,19 m para los aerogeneradores sin aspas, lo que conservando las proporciones dimensionales 1:8 implica una altura de 369,52 m, lo que genera los problemas que se plantean al final de este apartado.

Seguidamente, con estos valores se calcula el número de Reynolds, con la Ecuación 6.1, para los valores mínimo y máximo de velocidad del viento durante las tormentas de arena, establecidos en 17 m/s y 30 m/s respectivamente.

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu}$$

Donde:

- Re es el número de Reynolds.
- $\rho$  es la densidad de la atmósfera marciana, siendo de  $0,02$  kg/m<sup>3</sup> según la NASA.
- D es la longitud característica expresada en m, en el caso de los aerogeneradores sin aspas es el diámetro de 46,19 m.
- v es la velocidad del fluido, siendo según la NASA de 17 y 30 m/s para los valores mínimo y máximo, respectivamente.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, siendo de  $1,059 \cdot 10^{-5}$  Kg/m·s calculados con la Ecuación 6.2.

Con esta comprobación, se asegura la generación de energía durante los periodos donde los paneles solares no puedan trabajar a pleno rendimiento debido a las tormentas de arena. Se obtienen unos valores del número de Reynolds de  $1,48 \cdot 10^6$  y  $2,62 \cdot 10^6$  para los valores de velocidad de 17 m/s y 30 m/s respectivamente, ambos dentro del rango óptimo de funcionamiento establecido entre  $3 \cdot 10^5$  y  $3,5 \cdot 10^6$ .

Por otro lado, según la empresa constructora, es perfectamente aplicable el límite de Betz y la siguiente expresión convencional para el cálculo de la potencia del viento:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

**Ecuación 6.5**

Donde:

- P es la potencia del viento, expresada en W.
- $\rho$  es la densidad atmosférica, siendo de 0,020 kg/m<sup>3</sup> en Marte según la NASA.
- A es el área de barrido del aerogenerador determinada en m<sup>2</sup>, calculada para el aerogenerador sin aspas mediante la siguiente expresión:

$$A = D \cdot h$$

Donde:

- D es el diámetro del aerogenerador, toma el valor de 46,19 m (ver Ecuación 6.4).
- h es la altura del aerogenerador, toma el valor de 369,52 m.
- v es la velocidad del fluido, determinada en 23,5 m/s (ver Ecuación 6.3).

Para el cálculo de la potencia entregada por el aerogenerador, es necesario aplicar un coeficiente a esta ecuación, el cual se puede determinar para los aerogeneradores sin aspas sabiendo que en la Tierra este tipo de aerogenerador entrega una potencia de aproximadamente 100 kW con un equipo de 25 metros de altura con un factor de esbeltez promedio de 1:8 (3,125 m de diámetro) y una velocidad del viento de 12 m/s; lo que da un coeficiente de 0,7839 despejando de la Ecuación 6.5, quedando la siguiente expresión:

$$Coef. = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2 \cdot P}$$

**Ecuación 6.6**

Donde:

- Coef. es el coeficiente aplicado para este tipo de aerogenerador.
- $\rho$  es la densidad atmosférica, siendo de 1,1614 kg/m<sup>3</sup> en la Tierra (ver Tabla 6.2).
- A es el área de barrido del aerogenerador determinada en m<sup>2</sup>, calculada para el aerogenerador sin aspas mediante la siguiente expresión:

$$A = D \cdot h$$

Donde:

- D es el diámetro del aerogenerador, toma el valor de 3,125 m (ver Ecuación 6.4).
- h es la altura del aerogenerador, toma el valor de 25 m.
- v es la velocidad del fluido, que es de 12 m/s.
- P es la potencia del aerogenerador, que es de 100000 W.

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$v \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683

**Tabla 6.2** Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica. Fuente: INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor.

Una vez determinado este coeficiente, se puede calcular la potencia que se genera en la atmósfera marciana mediando la siguiente expresión:

$$P = coef. \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

**Ecuación 6.7**

Donde:

- P es la potencia generada, expresada en W.
- Coef. es el coeficiente aplicado para este tipo de aerogenerador, que es de 0,7839 [Ecuación 6.6].
- $\rho$  es la densidad atmosférica, siendo de 0,020 kg/m<sup>3</sup> en Marte según la NASA.
- A es el área de barrido del aerogenerador determinada en m<sup>2</sup>, calculada para el aerogenerador sin aspas mediante la siguiente expresión:

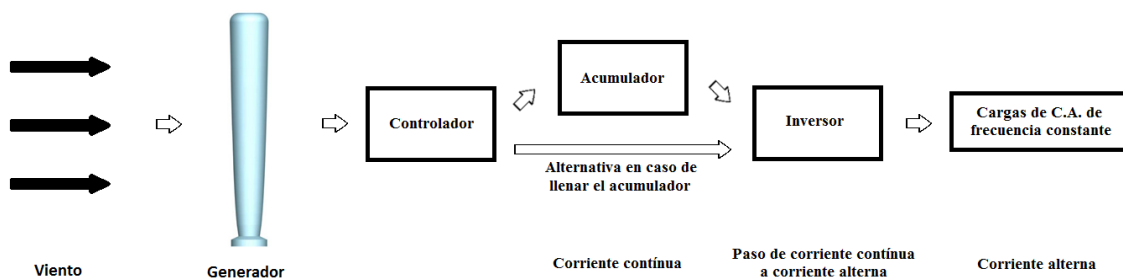
$$A = D \cdot h$$

Donde:

- D es el diámetro del aerogenerador, toma el valor de 46,19 m (ver Ecuación 6.4).

- $h$  es la altura del aerogenerador, toma el valor de 369,52 m.
- $v$  es la velocidad del fluido, determinada en 17 m/s como mínimo durante las tormentas de arena según la NASA.

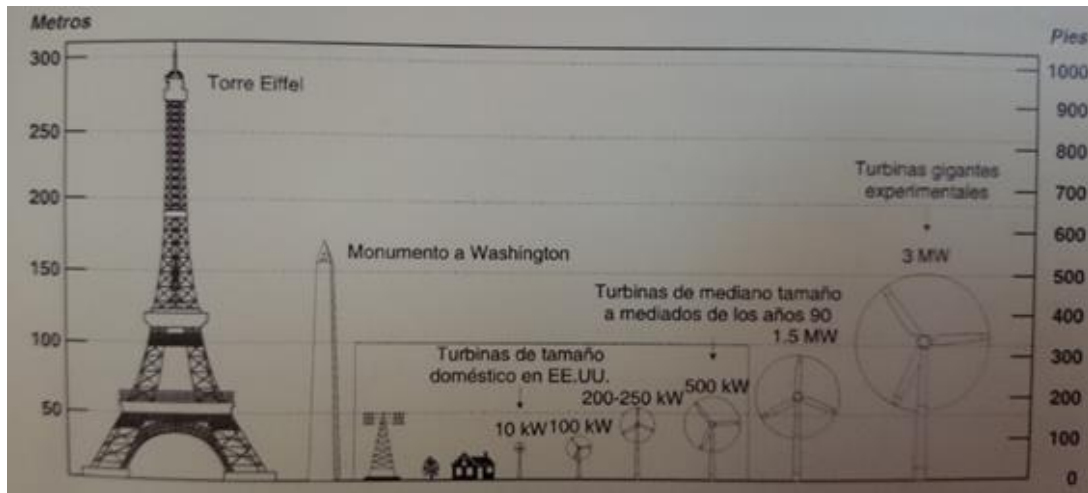
Finalmente, se consigue una potencia de 657,34 kW, lo que se corresponde a una energía de 16181,52 kW·h/día marciano por cada aerogenerador. Se satisface la demanda de 35755,86 W que suponen un consumo energético de 880,19 kW·h/día marciano con un único aerogenerador con un esquema de generación y consumo de energía como el que se muestra en la Figura 6.3.



**Figura 6.3** Esquema eléctrico de la generación y consumo de la energía eólica. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se consigue satisfacer la demanda con un único aerogenerador capaz de entregar una potencia eléctrica de 657,34 kW cuando el viento sopla a la mínima velocidad durante una tormenta de arena, es decir, 17 m/s, siendo necesario compartir el sistema de acumulación de energía con los paneles solares, ya que, la vida de los habitantes depende del suministro eléctrico. A pesar de ello, es necesario realizar el cálculo estructural para este aerogenerador prediseñado, ya que sus dimensiones, la capacidad del suelo para soportar la carga y las condiciones de funcionamiento son muy diferentes a las que se dan en estos aerogeneradores ofertados por la empresa DEUTECNO en la Tierra. Todo ello se incluye en el capítulo 9 Líneas futuras de desarrollo.

Con 369,52 m, resulta más alto que la torre Eiffel de París, pero hay que tener en cuenta que entrega una potencia de 657,34 kW eléctricos en una atmósfera con aproximadamente un 2 % de la densidad de la terrestre, por lo que, para conseguir esta potencia con un aerogenerador convencional y cubrir un área de 17068,13 m<sup>2</sup>, se necesitarían palas de 73,71 m de longitud, es decir, un diámetro del círculo de área barrida de 147,42 m y una altura superior a 200 metros manteniendo las proporciones entre longitud de las palas y altura de la torre. Por lo tanto, debido a la baja densidad de la atmósfera marciana, ambos tipos de aerogeneradores son superconstrucciones, siendo el aerogenerador convencional aún mayor a las turbinas gigantes experimentales de 3 MW de la Figura 6.4.



**Figura 6.4** Dimensiones típicas de aerogeneradores según su potencia. Fuente: GIPE, Paul. Energía eólica práctica

## 6.8 Energía solar

Se trata de una energía de tipo renovable debido a que su origen es el Sol, una estrella que genera energía mediante procesos naturales, alcanzando parte de esta energía la superficie terrestre en forma de radiación, permitiendo su explotación y siendo un recurso considerado inagotable debido a su duración estimada en 5000 millones de años. Se recibe en la superficie terrestre aproximadamente 9000 veces la cantidad de energía producida mediante combustibles fósiles y nucleares, permitiendo su aprovechamiento de diferentes maneras.

De forma directa, se puede aprovechar como iluminación y fuente de calor para calefacción, agua caliente mediante colectores, o incluso, permitiendo la generación de energía eléctrica en centrales termo-solares o mediante la conversión directa de radiación solar en electricidad con paneles fotovoltaicos.

Debido a que Marte también es un planeta del sistema solar, se puede explotar este tipo de energía, aunque debido a la mayor distancia al Sol, la radiación solar recibida en Marte será un 43 % de la que se recibe en la Tierra.

### 6.8.1 Energía eléctrica solar térmica

La energía eléctrica se genera gracias al aprovechamiento de la radiación solar, de manera directa o concentrada, lo que permite mover un motor térmico y posteriormente un generador.

Existen diferentes tecnologías en función de la temperatura alcanzada; variantes como “la chimenea solar”, que consiste en calentar grandes volúmenes de aire en un gran “invernadero” con una chimenea donde se sitúa una turbina eólica que se acciona por el flujo ascendente natural del aire caliente; por otro lado, los “concentradores solares de disco Stirling”, consistentes en instalar un motor Stirling que gira debido al

foco caliente generado mediante la concentración de radiación solar, alcanzando eficiencias en torno al 30% operando con temperaturas de hasta 1000 °C. A pesar de ello, la mayoría de tecnologías tienen como principio de generación de electricidad realizar un ciclo termodinámico convencional, con la diferencia de que la fuente de calor está proporcionada por la radiación solar, donde se calienta un fluido que posteriormente pasa por una turbina que acciona un generador.

Desgraciadamente, todas las tecnologías de generación de energía eléctrica solar térmica, tienen piezas móviles exigidas térmica y mecánicamente, lo que unido a los problemas de realizar mantenimiento y sustitución de piezas en Marte, convierten a la energía solar de tipo fotovoltaico en una mejor elección debido a su mayor fiabilidad.

### 6.8.2 Energía eléctrica solar fotovoltaica

La generación de energía eléctrica solar fotovoltaica consiste en aprovechar de forma directa la radiación solar, realizando la conversión a electricidad utilizando paneles fotovoltaicos.

Sin tener en cuenta los costes, podría pensarse que se trata del sistema definitivo de generación de energía, ya que, se genera directamente energía eléctrica a partir de radiación solar limpia y gratuita; carece de partes móviles, lo que permite realizar un mantenimiento extremadamente bajo; y además, pueden construirse con silicio, el segundo material más abundante en la Tierra.

Además de todas estas ventajas, existen diferentes materiales y tecnologías para generar energía eléctrica, lo que permite mejorar las prestaciones de los paneles solares instalados en Marte utilizando tecnologías más caras como los paneles de arseniuro de galio. A continuación, se muestran los diferentes tipos de materiales utilizados actualmente:

- Silicio cristalino

Se trata de células solares de silicio en estructura cristalina. Se pueden dividir en dos tipos: las más eficientes y caras formadas por silicio monocristalino, es decir, un solo cristal de silicio único y continuo, las cuales pueden sobrepasar un 17% de eficiencia; y las de silicio policristalino, formadas por pequeños granos de silicio monocristalino, que alcanzan el 14%.

Este tipo de célula fotovoltaica ha sido probada en Marte por el Mars Global Surveyor, cuya misión tuvo lugar en el año 1996 alimentado por cuatro paneles solares, dos de tipo GaAs (descritas a continuación) y dos de silicio, proporcionando 980 W con una superficie de 26,6 m<sup>2</sup>. Finalmente, en misiones de años posteriores se utilizan células fotovoltaicas de tipo GaAs.

- Arseniuro de galio

Se trata de un semiconductor compuesto formado por una estructura de cristal que consiste en la alternancia de átomos de galio y arsénico. Abreviado como

GaAs, se trata de un tipo de célula fotovoltaica más caro pero con el que se consigue mayor eficiencia, por lo que se utiliza en muchas aplicaciones espaciales donde esto es más importante que los costes.

Se trata del tipo elegido para la colonia humana por sus excelentes prestaciones y fiabilidad, habiendo sido probadas en Marte satisfactoriamente en múltiples ocasiones, como en las siguientes misiones: Mars Global Surveyor (1996), donde se utilizaron dos paneles de tipo GaAs y dos de silicio; Mars Climate Orbiter (1998), con tres paneles solares de tipo GaAs/Ge; Mars Polar Lander (1999); Mars Odyssey (2001), con células de tipo GaAs; y finalmente, los rover de exploración Spirit & Opportunity en 2003 con células de tres capas de tipo GaInP/GaAs/Ge.

- Tecnologías de silicio de película delgada

Conocidas como silicio amorfo, a-Si, están compuestas por átomos de silicio mucho menos ordenados que en las de cristales policristalinos. Se suelen utilizar películas más delgadas, que unidas a un menor requerimiento de energía para su fabricación, permiten un coste de fabricación mucho menor, pero tienen el inconveniente de una menor eficiencia energética, situada entre el 4% y 8% para los módulos comerciales.

- Otras tecnologías de película delgada

Existen diferentes tecnologías de película delgada, siendo las más interesantes las que están basadas en semiconductores compuestos como el seleniuro de cobre e indio ( $\text{CuInSe}_2$ , conocido como CIS), seleniuro de cobre-indio-galio (CIGS) y telururo de cadmio ( $\text{CdTe}$ ).

Las células de tipo  $\text{CdTe}$  serían muy interesantes en la Tierra porque se fabrican con un proceso relativamente barato y sencillo alcanzando eficiencias en torno al 10%, pero tienen el inconveniente de que el cadmio es una sustancia altamente tóxica. En Marte este no es el problema, sino que no merece la pena utilizarlas porque las células de tipo GaAs dan mayor eficiencia y mayores costes, pero estos últimos no son tan importantes como la eficiencia energética.

Una tecnología innovadora que si es interesante en Marte, es la de células fotovoltaicas multiunión, formadas por uniones p-n afinadas para absorber la luz de diferentes partes del espectro solar. Desgraciadamente, no es una opción introducir este tipo de células en la colonia porque su novedad implica desconocimiento acerca de su fiabilidad, siendo interesante probar la tecnología en Marte para que su fiabilidad quede garantizada como para los otros materiales, un factor clave para la supervivencia de los habitantes de la colonia.

Debido al elevado coste de los paneles fotovoltaicos, se puede incrementar la producción eléctrica mediante sistemas de concentración de radiación solar, lo que provoca problemas de temperatura que implican instalar sistemas de refrigeración en la Tierra pero no en Marte (hasta cierto nivel de concentración), gracias a la baja



temperatura del planeta. A pesar de ello, debido a los sistemas de seguimiento del Sol formados por sensores, motores y controles, no se utiliza este sistema en la colonia con el objetivo de conseguir una alta fiabilidad en la generación de energía aunque ésta sea menor.

Actualmente existen placas solares funcionando correctamente en el espacio, como en la Estación Espacial Internacional, pero en Marte existen grandes diferencias que debemos tener en cuenta:

- Disminución de la intensidad solar recibida debido a la arena suspendida en la atmósfera

Un factor muy importante para la producción de energía solar es la arena presente en la atmósfera, ya que, disminuye la radiación solar que incide en las placas fotovoltaicas, hecho que resulta determinante durante las tormentas de arena. Estas tormentas de arena, comentadas en el apartado 2.2 Diferencias con la Tierra, surgen porque el viento arrastra el polvo que cubre la superficie marciana.

Durante estas tormentas, disminuye drásticamente la producción de energía solar, pudiendo ser de tipo local, durando pocas horas al día; o globales, de tipo estacional y aunque no tienen lugar todos los años, debemos tenerlas en cuenta porque pueden alcanzar hasta los cien días de duración. Durante la misión Mariner 9 realizada en 1971, tuvo lugar una de las mayores tormentas de arena observadas en Marte, que obligó a retrasar el inicio de la misión, empezando la tormenta el 22 de septiembre de 1971 y no amainando hasta diciembre de ese mismo año.

La mejor opción para producir energía puede ser bastante diferente durante una tormenta de arena y durante periodos de claridad, pero debido a que siempre se verá muy mermada la producción de energía, la colonia se abastece mediante los aerogeneradores del apartado 6.7.2 Aerogeneradores sin aspas para cubrir la demanda energética durante estas tormentas.

- Luz solar indirecta

Debido a la dispersión que tiene lugar en la atmósfera marciana, durante un día despejado aproximadamente el 30 % de la radiación incidente es indirecta, es decir, proviene de diferentes ángulos y no en línea recta desde el Sol. Sin embargo, cuando la profundidad óptica es alta, este tipo de radiación solar indirecta alcanza valores del 99 % respecto al total incidente.

Este hecho será importante para seleccionar el tipo célula solar porque generará mayor cantidad de energía si es capaz de generarla cuando la radiación solar influye desde diferentes ángulos y no solamente en línea recta.



- Baja temperatura de operación

Otro factor que no podemos pasar por alto para la selección del tipo de células fotovoltaicas es que la temperatura en el lugar de la colonia varía desde los  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$  como podemos ver en el apartado 4.3 Ubicación. Desde el punto de vista energético, esto puede afectar al rendimiento, pero únicamente debemos asegurarnos probando nuestros paneles solares en condiciones de baja temperatura de funcionamiento, sin ser un gran problema porque varios tipos de células fotovoltaicas han sido probadas satisfactoriamente en rovers de exploración en la superficie marciana.

- Arena depositada

Otro inconveniente derivado de las tormentas de arena es que también afectan a la producción de energía una vez que éstas han finalizado. Esto se debe a que los paneles solares quedarán cubiertos de una capa de polvo que reduce la radiación solar que llega a los paneles y afecta significativamente a su rendimiento.

Debido a que en nuestro caso se trata de una colonia permanente, estamos obligados a implantar un sistema capaz de limpiar los paneles solares y eliminar este polvo superficial que impide el correcto funcionamiento de los paneles.

Para el diseño de estos sistemas de limpieza, debemos tener en cuenta que el agua además de congelarse, no es un recurso abundante en Marte; y tampoco hay líquidos que nos permitan arrastrar las partículas de polvo.

Por ello, hemos pensado en instalar unos dispositivos que soplen una corriente de aire atmosférico (principalmente  $\text{CO}_2$ ) a modo de ventilador, eliminando periódicamente el polvo depositado. Este sistema tiene el inconveniente de que al soplar, el polvo vuelve a quedar suspendido y puede caer de nuevo en paneles cercanos.

Finalmente, se ha determinado que el mejor sistema para limpiar el polvo de los paneles es el que posee el sensor de radiación ultravioleta del instrumento REMS instalado en el rover Curiosity, capaz de eliminar el polvo marciano mediante el uso de campos magnéticos. Esto se debe a que el polvo queda cargado electrostáticamente tras la fricción que tiene lugar en la atmósfera durante las tormentas, lo que permite desplazarlo de la superficie de los paneles solares y posibilitar el correcto funcionamiento de los mismos.

Finalmente, teniendo en cuenta todas las dificultades anteriores y que en la misión Mars Global Surveyor (1996) se probaron diferentes tipos de células fotovoltaicas con dos paneles de tipo GaAs y dos de silicio, utilizando en misiones de años posteriores únicamente células de tipo GaAs, se utiliza este tipo de células fotovoltaica de arseniuro de galio para la generación de energía solar en la colonia porque está comprobado que son adecuadas y fiables, ya que han sido probadas en

diferentes rover de la NASA obteniendo resultados satisfactorios, lo que repercute satisfactoriamente sobre la seguridad de los habitantes de la colonia. Además, este tipo de paneles solares pueden encontrarse en empresas como Semprius, cuyos paneles poseen una eficiencia solar que alcanza el 35,5 %, muy superior a la que se consigue mediante paneles de silicio.

De cara a la generación de energía, es un hándicap que Marte esté a una mayor distancia del Sol, lo que reduce la irradiancia solar desde los 1367,6 W/m<sup>2</sup> de la Tierra hasta los 589,2 W/m<sup>2</sup> en Marte, lo que reduce la energía proporcionada por los paneles solares, por ejemplo en la misión Mariner 9 de 800 W en la Tierra a 500 W en Marte.

Debido a que se han obtenido por medio de la NASA datos sobre la generación de energía de los paneles del rover Opportunity con 1,3 m<sup>2</sup> de células de tipo GaAs, se sabe que se consigue una generación de aproximadamente 692 w·h/m<sup>2</sup> de energía durante un día marciano cuando son nuevos y están limpios, calculados mediante la siguiente expresión:

$$\text{densidad energética} = \frac{E}{S}$$

Donde:

- Densidad energética es la energía generada por unidad de superficie y día marciano, expresada en w·h/m<sup>2</sup>·día marciano.
- E es la energía generada por día marciano, siendo de 900 w·h/día marciano según la NASA.
- S es la superficie del panel solar, siendo de 1,3 m<sup>2</sup> según la NASA.

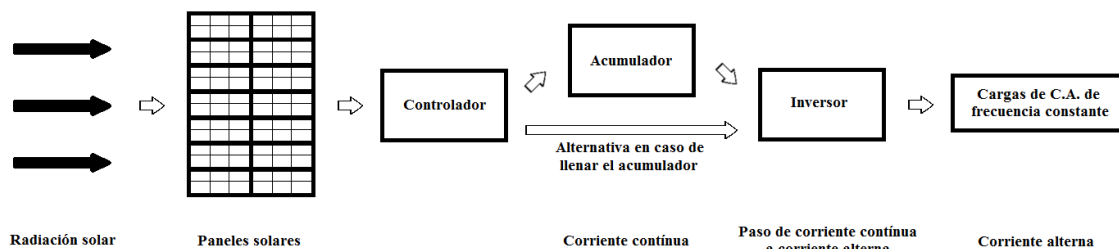
A pesar de obtener el dato de 692 w·h/m<sup>2</sup> de energía durante un día marciano, para conocer el funcionamiento de los paneles de nuestra colonia, así como para un correcto dimensionamiento de ampliaciones en la colonia o nuevas colonias, es importante monitorizar la energía producida a lo largo de los días en función de diferentes parámetros de operación, como la radiación recibida o la temperatura.

Por otro lado, a pesar de instalar un sistema de limpieza, no es posible mantener los paneles en las mismas condiciones que cuando son nuevos y acaban de ser instalados, por ello, además de las posibles sombras en determinados momentos a pesar de separar los paneles en función de su altura y la latitud de su ubicación, se aplica un coeficiente de seguridad de 1,5 a la energía generada, obteniendo 461,33 w·h/m<sup>2</sup>·día marciano. Además, aunque no todos los años tengan lugar tormentas de arena estacionales, se debe tomar el peor de los casos para estar siempre en el lado de la seguridad, por lo que se estima que tiene lugar una larga tormenta de arena de 100 días cada año. Esto no afecta a la energía generada por día marciano, ya que, en estas condiciones la energía es aportada por los aerogeneradores.

Para optimizar la generación de energía mediante los paneles solares, éstos pueden instalarse en soportes móviles capaces de orientar los paneles para realizar un seguimiento del Sol, consiguiendo que la radiación incida sobre ellos de la manera más perpendicular posible. Estos soportes están gobernados por control electrónico que recibe datos mediante sensores y realiza el seguimiento del Sol mediante el movimiento de motores eléctricos como los de la marca maxon motor, probados en Marte obteniendo una gran fiabilidad en el rover Opportunity. Siendo muy importante la fiabilidad de todos los sistemas de la colonia por las dificultades en las reparaciones, en el caso de estos motores se han celebrado diez años de funcionamiento de 39 de estos motores instalados en el rover Opportunity, en una misión diseñada inicialmente para una duración de 90 días.

Finalmente, a pesar de poder incrementar la energía generada con el seguimiento solar, debido a la importancia de la seguridad, se toma el dato anterior de  $461,33 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  de energía generada por día marciano. Con una demanda de  $35755,86 \text{ W}$ , determinado en el capítulo 5 Energía requerida, supone un consumo energético de  $880,19 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{día}$  marciano; por tanto, se determina que para satisfacer esta demanda energética total de la colonia son necesarios  $1907,94 \text{ m}^2$  de paneles solares de tipo GaAs, es decir, 1468 paneles solares de GaAs de  $1,3 \text{ m}^2$  cada uno que generan una energía en conjunto de  $1321,2 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{día}$  marciano cuando son nuevos y están limpios.

Debido a que se genera suficiente energía durante el día para abastecer la colonia pero en ciertos momentos del día la energía generada es mayor o menor a la consumida, es necesario instalar un acumulador de energía del mismo modo que en la reciente misión Mangalvaan (2013), la cual utiliza a una batería de iones de litio de 36 Ah como acumulador para la energía proporcionada por  $2,52 \text{ m}^2$  ocupados por paneles solares. Puede verse en la Figura 6.5 el esquema simplificado de generación y consumo de la energía solar, donde se incluyen el inversor, cuya función es cambiar un voltaje de corriente continua a un voltaje de corriente alterna con la magnitud y frecuencia de diseño; el acumulador del capítulo 7 Acumuladores de energía, necesario debido a las diferentes potencias de generación y consumo, generado en gran medida por el cese de producción durante la noche, ya que durante las tormentas de arena de hasta 100 días de duración la energía consumida es generada mediante los aerogeneradores del apartado 6.7.2 Aerogeneradores sin aspas.



**Figura 6.5** Esquema eléctrico de la generación y consumo de la energía eólica. Fuente: Elaboración propia

Para controlar el funcionamiento de los paneles, se instala un sistema de comunicaciones que permita la monitorización continua del funcionamiento de los 1468 paneles y los equipos así como su control. Tras realizar las conexiones en serie, sumando el voltaje de las células y paneles, o en paralelo sumando la intensidad eléctrica, se pueden instalar conexiones inalámbricas con los sensores utilizando enlaces WiMAX y WiFi. Debido a que este tipo de tecnologías no han sido probadas en Marte y a que la transmisión de datos mediante fibra óptica no se ve alterada por las ondas electromagnéticas, ya que no se ve afectado por la inducción eléctrica, se toma el sistema de fibra óptica porque existe la posibilidad de interferencias en los demás sistemas y que no funcionen correctamente.

Además de mediante fibra óptica, la transmisión de datos se puede realizar con tecnologías como la de tipo WiFi (Wireless Fidelity), muy extendida actualmente y con la existencia de diferentes estándares, todos basados en la comunicación mediante ondas permitiendo gran flexibilidad; la tecnología WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), para la que también existen varios estándares debido a las modificaciones que han ido surgiendo, la cual se basa en la transmisión de datos mediante ondas de radio, lo que permite enlaces inalámbricos de larga distancia; o finalmente, una tecnología más económica y fiable, como una conexión mediante cable de Ethernet.

Los principales sensores utilizados para tomar mediciones de variables importantes en la producción de energía solar son transformadores de intensidad toroidales, capaces de medir la corriente sin necesidad de interrumpir el circuito eléctrico; captadores de tensiones, capaces de medir la tensión eléctrica; sondas de temperatura, para detectar posibles problemas si se dan temperaturas anómalas, captadores de señales analógicas y digitales, capaces de recoger las señales adquiridas por los equipos; y finalmente, analizadores de energía o de red, para conocer el comportamiento eléctrico.

# Capítulo 7

---

## Acumuladores de energía

## 7 Acumuladores de energía

Los acumuladores de energía son necesarios en la colonia para lograr satisfacer la demanda energética durante periodos donde la energía generada es menor a la consumida, tomando como dato de diseño que la energía consumida durante un día marciano puede alcanzar 880,19 kW·h tras aplicar un coeficiente de seguridad, ya que, depende de ello la vida de los habitantes de la colonia.

Estos periodos con mayor consumo que generación, suceden tanto para la generación de energía solar, donde por las noches se consume más de lo generado y por el día se invierte esta situación, como para la energía proporcionada por los aerogeneradores durante las tormentas de arena, donde se utilizan estos generadores porque pueden darse largos periodos de hasta cien días terrestres sin radiación solar suficiente para abastecer a la colonia.

Debido a que los paneles solares son capaces de generar 1321,2 kW·h/día marciano cuando son nuevos y están limpios, pero de manera irregular debido a una generación despreciable durante la noche y una mucho mayor durante el día, la capacidad de las baterías debe ser suficiente para almacenar al menos la energía consumida durante medio día marciano, tomando finalmente una capacidad mínima de 2640,57 kW·h que equivalen al consumo energético de hasta tres días marcianos, ya que la seguridad de los habitantes depende directamente del abastecimiento de energía, logrando aumentarla con este sobredimensionamiento.

La energía eólica comparte el sistema de almacenamiento de energía con el fin de aumentar la seguridad de la colonia, aunque en principio no es necesario debido a que durante las tormentas de arena aumenta la velocidad del viento y los aerogeneradores proporcionan una potencia eléctrica notablemente superior a la consumida.

Para almacenar la energía se pueden utilizar diferentes sistemas:

- **Bombeo de agua:** Consiste en bombear agua a cierta altura para acumular energía potencial que puede aprovecharse posteriormente mediante una turbina. Descartado en Marte debido a la dificultad de obtener agua y mantenerla en estado líquido con las condiciones climáticas existentes.
- **Aire comprimido:** Consiste en utilizar la energía para comprimir aire y aprovecharla posteriormente con motores neumáticos, descartado en Marte por la existencia de sistemas con menos partes móviles y más fiables.
- **Electrolisis del agua:** Consiste en utilizar la energía para separar los elementos que forman las moléculas del agua, consiguiendo por separado hidrógeno y oxígeno de los que se puede obtener de nuevo la energía mediante su combustión o el uso de una pila de combustible. Finalmente, se descarta el uso de este sistema por la notable pérdida de energía debida al bajo rendimiento

tanto en la obtención del hidrógeno como en la recuperación de la energía química almacenada en el mismo.

- **Volante de inercia:** Consiste en utilizar la energía para elevar la energía cinética de rotación de una masa que gira en torno a un eje, permitiendo recuperarla de nuevo al disminuir la velocidad de giro. Debido a su constitución, es posible realizar descargas totales repetidamente sin deteriorarse, funcionar en un rango de temperatura amplio y obtener un lento deterioro por el paso del tiempo. Su principal problema es la tasa de autodescarga, aunque puede ser una de las mejores si el volante gira en un medio al vacío y sobre cojinetes magnéticos en los que no hay contacto físico que produzca rozamiento. Por tanto, teóricamente se trata del mejor sistema de almacenamiento de energía, pero debido a que el modelo desarrollado por la NASA únicamente ha sido ensayado en pruebas, no se usa este sistema debido a que, a diferencia de las baterías eléctricas, no ha sido probado en condiciones reales de funcionamiento y por tanto, no está asegurada su fiabilidad en dichas condiciones.
- **Condensador:** Consiste en almacenar directamente la energía eléctrica al aplicar una diferencia de potencial entre dos materiales conductores separados por un material dieléctrico o por el vacío, con lo que se consigue almacenar energía y liberarla muy rápidamente al establecer la conexión eléctrica entre ambos materiales conductores. Finalmente se descarta este tipo de almacenamiento energético por su baja densidad energética, es decir, para almacenar una cierta cantidad de energía se precisa de más masa que con cualquier otro sistema, lo que supone un gran inconveniente en Marte.
- **Baterías eléctricas:** Consiste en almacenar energía química mediante reacciones electroquímicas reversibles, por lo que aplicando una diferencia de potencial tienen lugar estas reacciones que consumen energía que se puede recuperar conectando ambos polos de la batería. Existen diferentes tipos de baterías en función de los materiales utilizados en su construcción, siendo las más comunes las de plomo-ácido, níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal hidruro (NiMH), iones de litio (Li-ion) y polímeros de iones de litio (LiPo). En función del tipo ofrecen diferentes características de vida útil, tiempo de carga, tasa de autodescarga y densidad energética, tal y como se muestra en el siguiente apartado, ya que, este es el método elegido para el almacenamiento de la energía debido a que las baterías son un sistema con relativa sencillez, buen rendimiento y muy fiables con escaso o nulo mantenimiento.

## 7.1 Baterías eléctricas

Las baterías han sido un método de almacenamiento energético utilizado en diferentes misiones de la NASA obteniendo resultados satisfactorios (ver Tabla 7.1), siendo muy interesante su utilización en la colonia por su escaso o nulo mantenimiento y su ya probada fiabilidad.

Tecnología	Energía específica [W·h/kg]	Ciclos de vida	Problemas
Ag-Zn, Li-SO, Li-SOCl <sub>2</sub>	90 - 250	1	Rango de temperatura limitado
Ni-Cd, Ni-H <sub>2</sub>	24 - 35	> 50000	Pesadas y voluminosas, rango limitado de temperatura
Li-Ion	100	> 400	Ciclos de vida

**Tabla 7.1** Estado del arte de diferentes tipos de baterías. Fuente: NASA

Debido a estas características, las baterías de litio son el tipo elegido para almacenar los 2640,57 kW·h de energía en la colonia, ya que, poseen la mejor densidad energética y a pesar de tener menor número de ciclos de vida que las de níquel, no es un problema porque están sobredimensionadas. Este sobredimensionamiento da lugar a que en una carga se consiga almacenar energía para tres días, por lo que en su uso normal solo se utiliza una sexta parte de la capacidad (correspondiente al consumo de medio día) durante la noche, dando lugar a que con más de 400 ciclos se consiga una vida útil superior a 2400 días marcianos, el tiempo equivalente a más de seis años terrestres. Además de existir baterías de Panasonic con una vida útil de 5000 ciclos, como se muestra más adelante, las baterías de litio no se ven afectadas por el llamado efecto memoria, por el cual en cada recarga realizada sin que la batería estuviese descargada se limita el voltaje o la capacidad debido a la creación de cristales en el interior de la batería, lo que supondría un gran inconveniente en la colonia debido a que por seguridad, es aconsejable recargar la batería cada día y estar cerca del 100% de su capacidad.

Como puede verse en la Tabla 7.1, el Spirit y el Opportunity ya tenían baterías de litio. Además, en la reciente misión Mangalyaan (2013) se almacena la energía generada por 2,52 m<sup>2</sup> de paneles solares (capaces de generar 800 W de potencia en Marte) con una batería de iones de litio de 36 amperios hora, con un esquema de generación y almacenamiento energético similar al de nuestra colonia y al utilizado por la empresa SolarCity, líder estadounidense en proporcionar energía renovable a viviendas, colegios y edificios gubernamentales.

Elon Musk, director de esta empresa líder que utiliza una configuración de paneles solar unidos a baterías al igual que nuestra colonia, es el director ejecutivo y director técnico ejecutivo de la empresa SpaceX, la primera compañía privada en realizar labores de carga a la Estación Espacial Internacional y capaz de suministrar carga como comida o repuestos a la colonia marciana gracias a sus naves SpaceX Dragon comentadas en el apartado 4.4.4.1 Abastecimiento de alimentos. Además, también es director ejecutivo de la empresa Tesla Motors, dedicada a la venta de coches eléctricos equipados con baterías de litio y con la previsión de construir una gigafactoría de este tipo de baterías que permita abaratar el coste en más de un 30 %.



A pesar de necesitar baterías para el sistema de generación mediante energía solar y para el de energía eólica, se usarán las mismas baterías para ambos debido a que no están diseñados para trabajar simultáneamente, ya que, los aerogeneradores están diseñados para trabajar durante las tormentas de arena que disminuyen seriamente la radiación solar que alcanza la superficie marciana, y además, éstos son capaces de generar energía sobrante en todo momento.

Por tanto, son útiles sistemas como el que anunció la empresa Panasonic Corporation que consiste en la producción de baterías de iones de litio compactas y de larga duración para las aplicaciones domésticas de energía solar, con 5000 ciclos de vida útil, una capacidad modular de 1,35 kW·h y un sistema de administración de la batería diseñado para controlar los procesos de carga y descarga.

Finalmente, debido a que la cantidad de energía a almacenar, la cual se corresponde con tres veces la energía consumida en un día marciano (2640,57 kW·h), se necesitan 1956 módulos de estas baterías o un pack formado por 236611 baterías del modelo NCR18650A también de la empresa Panasonic. Tomando las baterías de modelo NCR18650A como el acumulador de energía para la colonia, el cual constituye la batería del vehículo eléctrico Tesla Model S, se consigue almacenar 11,16 W·h de energía en cada una de ellas, con aproximadamente 45,5 g de peso. Debido a estas características, mostradas en la Figura 7.1, se almacenan 2640,58 kW·h con un peso de aproximadamente 10,77 toneladas, lo que resulta un inconveniente para realizar el transporte desde la Tierra pero se compensa con que no requieren mantenimiento y su duración. Esta elevada duración se consigue gracias a que en un día típico se utiliza únicamente un sexto de la capacidad total debido al sobredimensionamiento, por lo que con un mínimo de 400 ciclos de vida útil son capaces de funcionar correctamente durante al menos 2400 días marcianos, equivalente a más de 6 años terrestres.



**Figura 7.1** Ficha técnica de la batería NCR18650A. Fuente: Panasonic

# Capítulo 8

---

## Fuentes de energía no renovable

## 8 Fuentes de energía no renovable

### 8.1 Energía nuclear

A pesar de ser teóricamente posible el abastecimiento de energía mediante energías renovables como hemos visto en el capítulo 6 Fuentes de energía renovable y con multitud de rover de exploración abastecidos mediante paneles solares, la energía no renovable, y concretamente la nuclear debido a la casi inexistencia de oxígeno para que tenga lugar un proceso de combustión, presenta múltiples ventajas y ha sido utilizada recientemente en el rover Curiosity de la NASA.

Las ventajas del uso de energía nuclear son la posibilidad de utilizar este tipo de energía también para la propulsión de la nave, reduciendo el peso de la misma; y principalmente, la generación ininterrumpida de electricidad, proporcionando una seguridad añadida a la colonia al garantizar el suministro de energía durante años con una cantidad mínima de combustible.

Los inconvenientes que presenta la tecnología nuclear en la Tierra no son tan acusados en Marte, ya que, la propia superficie de Marte es peligrosa para la vida humana desde el punto de vista de la radiación, por lo que igualmente se necesita un blindaje frente a la radiación dispongamos o no de un reactor nuclear.

Por ello, ya en 1978 se empezó por medio de la NASA, el DOD (Department Of Defense) y el DOE (Department Of Energy), el programa llamado SP-100 con el objetivo de desarrollar sistemas de abastecimiento energético mediante reactores nucleares de larga duración, compactos, ligeros y con un rango de potencia entre 50 kW y 1 MW eléctricos. Desarrollando finalmente un reactor capaz de generar 100 kW de potencia eléctrica durante siete años con únicamente 190 kg de combustible, es posible abastecer a la colonia con un único generador de 100 kW, ya que el consumo está establecido en 21039 W tras aplicar un coeficiente de seguridad a los 14025,95 W requeridos para el funcionamiento de todos los sistemas. Una vez agotado el combustible, es posible realizar el envío de más combustible en naves de carga como el Dragon de SpaceX, capaz de transportar 6000 kg de carga máxima.

Este mismo sistema de generación de energía mediante reactores nucleares se encuentra en la misión Mars Direct, donde se usa un reactor nuclear de 100 kW integrado en un camión teledirigido para proporcionar la energía necesaria para abastecer a una tripulación de cuatro personas.

# Capítulo 9

---

## Líneas futuras de desarrollo

## 9 Líneas futuras de desarrollo

### 9.1 Rover de exploración

Formando parte de varios estudios de misiones tripuladas, como Mars Direct, donde se pretendía explorar la superficie marciana durante 500 días mediante el uso de un rover presurizado, es útil añadir un rover de exploración a la colonia que permita a los habitantes investigar en otros lugares diferentes de la superficie marciana.

En primer lugar, hay que determinar si se trata de un rover en el que realizar pequeñas exploraciones o de larga duración, determinando la necesidad de recoger agua y generar oxígeno para garantizar la supervivencia de las personas que están en su interior. El mayor problema podría estar en permanecer durante mucho tiempo en el rover debido a la cantidad de radiación recibida, ya que es más importante que en la colonia el peso del blindaje y resulta más complicado de aislar si hay alguna superficie que permita la visualización directa; siendo una posible solución instalar cámaras que permitan visualizar el exterior y blindar completamente el rover.

Pudiendo ser un vehículo alimentado por energía eléctrica, podría ser utilizado únicamente cuando hay excedentes de energía para no comprometer la seguridad de la colonia. Además, son muy interesantes los motores eléctricos de la empresa maxon motor, instalados 39 de ellos en el rover Opportunity logrando superar diez años de funcionamiento sin averías.

### 9.2 Blindaje frente a la radiación

Debido a los problemas de salud que ocasiona la radiación ionizante, analizados en el apartado 4.2.2 Radiación, es necesario dotar a la colonia con un blindaje que proteja a los habitantes.

A nivel de desarrollo actual, los materiales utilizados como escudos frente a la radiación, como el plomo o el hormigón, suponen un inconveniente en el transporte debido a su elevado peso. A modo de ejemplo, los rayos gamma que requieren 1 cm de plomo para reducir la intensidad de radiación en un 50%, necesitarían unos 6 cm de hormigón o 9 cm de tierra compacta para lograr el mismo efecto; por tanto, una posible solución sería realizar el blindaje con materiales poliméricos, que prometen buenas capacidades de aislamiento siendo mucho más ligeros, o situar la zona habitable bajo tierra, siendo necesario llevar a cabo excavaciones que permitan conocer el suelo de Marte con detalle.

### 9.3 Calefacción mediante captadores solares

Un sistema de calefacción mediante captadores solares como el de la Figura 4.14, permitiría aprovechar la energía de la radiación solar para calentar agua sin aporte de energía eléctrica, o al menos reduciéndolo si se tratase de un sistema mixto.

Si se pudiera realizar una interpolación lineal, el rendimiento del captador sería del 39 %, como se muestra en la Figura 4.15, pero debería ser estudiado con mayor profundidad. Es por eso, que sería interesante realizar un estudio acerca de calefacción mediante captadores solares, pudiendo resultar viable y reducir el consumo energético de la colonia, superior a 13 kW en el caso de la calefacción.

### 9.4 Aporte de comida con independencia de la Tierra

Como se ha dicho en el apartado 4.4.4.1 Abastecimiento de alimentos, el alimento de los habitantes de la colonia consiste en comida deshidratada suministrada cada dos años por naves de carga como la Dragon de la empresa SpaceX.

Es interesante desarrollar un sistema capaz de proporcionar comida fresca y con independencia de la Tierra, pudiendo utilizar la materia orgánica generada por los propios habitantes de la colonia como abono e iluminación tipo LED para permitir a las plantas realizar la fotosíntesis sin intervención de la luz solar, la cual provocaría la muerte de sus células debido a la elevada dosis de radiación que recibirían.

Respecto a la utilización de iluminación de tipo LED, la compañía Green Sense Farms (GSF), especialista en cultivos en interiores, está investigando con ayuda de Philips sobre optimizar luces LED en función del cultivo, modificando parámetros como la intensidad y longitud de onda de la luz más adecuada para cada planta, con el fin de realizar cultivos verticales en edificios y aplicable también a la colonia.

### 9.5 Abastecimiento energético de los sistemas de abastecimiento de agua

Debido al elevado consumo energético de estos sistemas, establecido en 126 kW frente a los 35,76 kW de consumo de la colonia y a la necesidad de desplazamiento del sistema que obtiene agua del suelo marciano, es interesante desarrollar un sistema de abastecimiento energético capaz de aportar energía con independencia de la colonia. Un ejemplo podría ser un generador alimentado mediante energía nuclear, ya se ha utilizado en misiones anteriores como, por ejemplo, en el rover Curiosity.

## 9.6 Energía geotérmica

De manera similar a los captadores solares, un sistema de calefacción haciendo uso de energía geotérmica funcionaría sin aporte de energía eléctrica, o al menos reduciéndolo si se tratase de un sistema mixto.

En este caso, se trata de aprovechar el calor del subsuelo del planeta para obtener energía térmica. Para poder utilizar este tipo de energía sería necesario realizar excavaciones sobre la superficie marciana para llevar a cabo un estudio geotérmico que determinara si es posible aprovechar la inercia térmica del suelo para instalar una bomba de calor geotérmica en lugar de radiadores eléctricos menos eficientes.

Los recursos geotérmicos más útiles se dan cuando es posible aprovechar el calor mediante acuíferos con agua caliente o incluso vapor, permitiendo la generación de electricidad cuando la temperatura es lo suficientemente alta. Otra forma de aprovechar este tipo de energía es utilizar la tecnología conocida como yacimientos secos o roca seca caliente, que consiste en perforar a profundidades considerables para alcanzar las “rocas calientes” e inyectar agua fría para obtener agua caliente utilizando las rocas a modo de intercambiador de calor.

Para ello, es necesario realizar mediciones anteriores a la instalación de la colonia, o una vez instalada la colonia, posibilitando la realización del estudio para incluir este tipo de energía en colonias posteriores.

Anteriormente, en la misión Mars 96 se incluían dos penetradores de la superficie pero desgraciadamente la misión fracasó antes de poder realizar las perforaciones. La misión Deep Space 2 también fracasó; los datos que se pretendían obtener en esta misión habrían sido muy útiles para estudiar la posibilidad de hacer uso de energía geotérmica en Marte porque el objetivo era estudiar el subsuelo para probar la presencia de hielo bajo la superficie y determinar las propiedades y el gradiente de temperaturas del material subsuperficial, aunque con el inconveniente de que iba a ser realizada en una zona muy diferente a la elegida para la colonia.

La mayor excavación realizada en Marte es del orden de unos pocos centímetros, por lo que no tenemos datos fiables del gradiente de temperaturas existente. Antes de realizar este tipo de instalación debemos tener datos más fiables y hacer un test de respuesta geotérmica.

## 9.7 Diseño estructural del aerogenerador sin aspas de 56 m de diámetro.

Debido a las diferencias de tamaño y de condiciones entre el aerogenerador de la empresa DEUTECNO y entre Marte y la Tierra, es necesario realizar un estudio para asegurar el correcto funcionamiento del generador.

# Capítulo 10

---

## Conclusión



## 10 Conclusión

Tras la realización del estudio de viabilidad técnica para el abastecimiento energético de una colonia humana en Marte, se llega a la conclusión de que con la tecnología actual es posible superar los principales retos y establecer una colonia humana permanente en la superficie marciana. Aunque simplemente el hecho de vivir en Marte y de emplear únicamente energías renovables, da lugar a problemas para la salud y para satisfacer el consumo de la colonia en todo momento, respectivamente.

Este consumo energético está establecido en 35,76 kW tras aplicar un coeficiente de seguridad a los 23,84 kW requeridos para el funcionamiento de todos los sistemas, lo que deriva en las siguientes dificultades si se utiliza únicamente energía de tipo renovable:

- Producción irregular de energía: solventado hasta cierto punto mediante la instalación de baterías de iones de litio capaces de almacenar la energía necesaria para abastecer completamente la colonia durante un periodo de tres días.
- Dependencia de la supervivencia de los habitantes de las condiciones atmosféricas debido a que la producción de energía depende del viento en el caso de la energía eólica y de la radiación en el caso de la energía solar, ambas variables por naturaleza y muy influenciadas por las tormentas de arena donde aumenta la velocidad del viento y el polvo en suspensión reduce drásticamente la radiación que llega a la superficie marciana
- La construcción de un aerogenerador de más de 360 m de altura. Las condiciones atmosféricas presentes en la superficie marciana, como la baja densidad, suponen la construcción de un aerogenerador de mayor tamaño que cualquier otro visto en la Tierra, con una altura cuatro veces superior a la línea de desarrollo de la empresa DEUTECNO fijada en equipos de poco más de 90 m de altura. Por ello, a pesar de ser capaz de abastecer a la colonia generando 657340 W en las condiciones de menor velocidad del viento durante las tormentas de arena, se ha incluido en el capítulo 9 Líneas futuras de desarrollo.

Para satisfacer la demanda establecida en 35,76 kW, además de este aerogenerador operando durante las tormentas de polvo, se incluyen 1468 paneles solares de GaAs con 1,3 m<sup>2</sup> de superficie cada uno que aportan la energía a la colonia mientras no tengan lugar tormentas de polvo que aumentan la velocidad del viento pero reducen drásticamente la radiación solar que alcanza la superficie marciana. Estos paneles son capaces de generar en conjunto, cuando son nuevos y están limpios, 1321,2 kW·h de energía por día marciano, el equivalente a una media de 53671 W de potencia eléctrica.

Por todo ello, este próximo paso en la expansión de los humanos por el universo, es más lógico de realizar con abastecimiento mediante energía de tipo nuclear, capaz de

proporcionar energía constantemente con independencia de factores variables y con el principal inconveniente que nos encontramos en la Tierra mermado, la radiación, ya que aún sin el reactor nuclear se debe instalar un sistema que proteja de la radiación debido a la falta de una atmósfera y campo magnético comparables a los de la Tierra que hacen las funciones de escudo y permiten el desarrollo de la vida tal y como la conocemos.

Por tanto, los inconvenientes se ven reducidos y las ventajas son importantes debido a que se garantiza el aporte energético a los sistemas que permiten la vida de los tripulantes, como la climatización o la obtención de oxígeno y agua. Por lo que con un único reactor como el del apartado 8.1 Energía nuclear se puede cubrir ampliamente la demanda energética de la colonia, ya que con 190 kg de combustible es capaz de generar 100 kW de potencia eléctrica continuamente durante un periodo de siete años. Además, estos sistemas de generación de energía nuclear son fiables, ya que han sido probados satisfactoriamente en rovers que realizan exploraciones muy lejos del Sol y recientemente en Marte con el rover Curiosity, el cual posee un reactor nuclear de radioisótopos capaz de proporcionar 125 W de potencia eléctrica durante años.

Además de las dificultades en el abastecimiento energético, existen otras como la radiación, que capaz de provocar graves problemas de salud e incluso la muerte en dosis elevadas, la cual es minimizada hasta límites tolerables mediante materiales que hacen la función de blindaje; la falta de agua, que finalmente se obtiene mediante la condensación del vapor atmosférico y la fusión del el hielo contenido en el suelo marciano; la falta de oxígeno y presión atmosférica, solventado mediante la obtención de oxígeno realizando la electrolisis del agua en un sistema ECLSS similar al que actualmente funciona en la Estación Espacial Internacional; y finalmente, problemas de salud provocados por motivos como la menor gravedad del planeta, por los que se pierde masa ósea y muscular, que unido a la falta de hospitales y el aislamiento de la vida en la Tierra hace que este problema no sea resuelto completamente, aunque sí superado en parte mediante la instalación de un gimnasio y dotar a la colonia de un médico y un psicólogo, además de ser posible establecer comunicación con la Tierra en todo momento.

Por tanto, es posible realizar una colonia humana en marte siguiendo los pasos lógicos en la expansión de los humanos por el universo, ayudando a comprender mejor la Tierra mediante la compresión de Marte, provocando mayor unidad global en la Tierra debido a la cooperación internacional, derivando de ello un avance en nuestro nivel tecnológico y despertando el interés en las futuras generaciones; pero también es cierto, que además del elevado coste económico estimado en 6000 millones de dólares americanos por el proyecto de la colonia Mars One, los habitantes de la colonia estarían expuestos a elevados riesgos de salud, por lo que tomando la idea de la misión Mars Direct, se consigue aumentar la seguridad de los habitantes realizando una primera colonia que permita tomar datos fiables y a lo largo del tiempo, conociendo mejor los problemas que puedan surgir y que permita realizar futuras colonias con un diseño más avanzado tras adquirir mayor conocimiento de Marte.

# Capítulo 11

---

## Bibliografía

## 11 Bibliografía

- Scientific Results of the Viking Project. Journal of Geophysical Research, 1977, V. 82, no. 28.
- REMS, una estación ambiental española en Marte. Revista de Astrobiología, 2012, no. 2.
- PORTREE, David S. F.. Humans to Mars: fifty years of mission planning, 1950–2000. Monographs in Aerospace History Series, 2001, no. 21. [Consulta: 21-06-2014].  
Disponible en: <http://history.nasa.gov/monograph21.pdf>.
- MOSELLE, Boaz; PADILLA, Jorge; SCHMALENSEE, Richard. Electricidad verde: Energías renovables y Sistema eléctrico. Madrid: Marcial Pons, 2010. 559 p. ISBN: 978-84-9768-793-5.
- GIPE, Paul. Energía eólica práctica. Sevilla: ProgenSA, 2000. 191 p. ISBN: 84-86505-88-7.
- WHITE, Frank. Mecánica de fluidos. Madrid: Mc Graw Hill, 2008. 6ª ed. 864 p. ISBN: 978-84-481-6603-8.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David. Fundamentos de Transferencia de Calor. España: Pearson, 1999. 4ª ed. 886p. ISBN: 970-17-0170-4.
- Space power and energy Storage roadmap. Technology Area 03, National Aeronautics and Space Administration. Abril 2012. [Consulta: 21-06-2014].  
Disponible en: [http://www.nasa.gov/pdf/501328main\\_TA03-ID\\_rev7\\_NRC\\_wTASR.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/501328main_TA03-ID_rev7_NRC_wTASR.pdf)

## 11.1 Bibliografía online

- NASA. ¿Por qué Marte?  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/marswhy.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Datos de Marte.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Comparación de Marte con la Tierra.  
[http://mars.jpl.nasa.gov/files/mep/MarsQuickFacts\\_Infographicx1000.png](http://mars.jpl.nasa.gov/files/mep/MarsQuickFacts_Infographicx1000.png)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Agencia Espacial Europea (ESA). Dimensiones de Fobos y Deimos.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Mars\\_Express/Facts\\_about\\_Mars](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express/Facts_about_Mars)  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Datos de la Luna.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Información misión Mariner 9.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1971-051A>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Misiones no tripuladas.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/marspage.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Centro de Astrobiología (CSIC-INTA). Datos del instrumento REMS y atmosféricos.  
<http://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/?r=true>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Mars One. Proyecto Mars One.  
<https://www.mars-one.com>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Exploración de Marte.  
[http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/mars\\_colonize\\_terraform.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/mars_colonize_terraform.html)  
[Consulta: 21-06-2014].

- The New York Times. Seres no hechos para el espacio.  
[http://www.nytimes.com/2014/01/28/science/bodies-not-made-for-space.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2014/01/28/science/bodies-not-made-for-space.html?_r=0)  
[Consulta: 21-06-2014].
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Radiación ionizante.  
<http://www.unscear.org/unscear/en/faq.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Environmental Protection Agency. Radiación no ionizante e ionizante.  
<http://www.epa.gov/radiation/understand/>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Directiva 96/29/Euratom. Normativa acerca de dosis de radiación tolerables.  
<https://www.csn.es/descarga/directiva96.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].
- United Nations. Fuentes y efectos de la radiación ionizante.  
[http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_Annex\\_B.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf)  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Efectos de la radiación ionizante.  
<http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section05.htm>  
[Consulta: 21-06-2014].
- CALTECH. Radiación en la superficie de Marte medida por el instrumento RAD del rover Curiosity.  
[http://authors.library.caltech.edu/42648/1/RAD\\_Surface\\_Results\\_paper\\_SCIENCE\\_12nov13\\_FINAL.pdf](http://authors.library.caltech.edu/42648/1/RAD_Surface_Results_paper_SCIENCE_12nov13_FINAL.pdf)  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Riesgos de una misión tripulada a Marte.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/marsprof.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Massachusetts Institute of Technology. Experimento Mars Gravity Biosatellite.  
<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/46514>  
[Consulta: 21-06-2014].

- NASA. Requisitos para vuelos espaciales de larga duración.  
<http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-483/contents.htm>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Condiciones presentes en Marte.  
<http://www-mgcm.arc.nasa.gov/>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Definición y diseño preliminar de la Estación Espacial Internacional.  
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870008409.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. ECLSS (Environmental Control and Life Support System).  
[http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/104840main\\_eclss.pdf](http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/104840main_eclss.pdf)  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Requisitos de diseño para misiones tripuladas.  
<http://msis.jsc.nasa.gov/Volume1.htm>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Informe misión Mars or Bust. Consumo de ECLSS (Environmental Control and Life Support System).  
[https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.colorado.edu%2FASSEN%2Fproject%2Fmob%2FECLSS\\_final\\_report%252012-13-03%2520version%25202.doc&ei=q72hU476IMs0QX0moGwCw&usg=AFQjCNH3F-45PRbtNvA\\_o9WV-Lk9oMu\\_sg&bvm=bv.69137298,d.d2k](https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.colorado.edu%2FASSEN%2Fproject%2Fmob%2FECLSS_final_report%252012-13-03%2520version%25202.doc&ei=q72hU476IMs0QX0moGwCw&usg=AFQjCNH3F-45PRbtNvA_o9WV-Lk9oMu_sg&bvm=bv.69137298,d.d2k)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Mars Journal. Sistemas de soporte de vida en Marte.  
[http://www.marsjournal.org/contents/2006/0005/files/rapp\\_mars\\_2006\\_0005.pdf](http://www.marsjournal.org/contents/2006/0005/files/rapp_mars_2006_0005.pdf)  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Tecnología espacial.  
[http://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/#.U6XHHv1\\_tD9](http://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/#.U6XHHv1_tD9)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Base Antártica Juan Carlos I.  
<http://www.dicat.csic.es/dicat/en/2012/39-la-base-antartica-espanola-juan-carlos-i-cumple-25-anos>  
[Consulta: 21-06-2014].

- Hugh Broughton Architects. Base Antártica Juan Carlos I.  
<http://www.hbarchitects.co.uk/projects.php?project-list=extreme&id=1>  
[Consulta: 21-06-2014].
- NASA. Dimensiones de la Estación Espacial Internacional.  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/main/onthestation/facts\\_and\\_figures.html#.U6XIzPl\\_tD9](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/onthestation/facts_and_figures.html#.U6XIzPl_tD9)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Philips. Características de bombillas de tipo LED.  
<http://www.philips.es/c/-/led-bombilla-8718291193029/prd/>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Philips. Agricultura de interior con iluminación de tipo LED.  
[http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2014/20140509-Philips-and-Green-Sense-Farms-usher-in-new-era-of-indoor-farming.wpd#.U6Hiqvl\\_tbp](http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2014/20140509-Philips-and-Green-Sense-Farms-usher-in-new-era-of-indoor-farming.wpd#.U6Hiqvl_tbp)  
[Consulta: 21-06-2014].
- SpaceX. Características de la nave de carga Dragon.  
<http://www.spacex.com/dragon>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Universidad de Washington. Extracción de agua de la atmósfera marciana.  
<http://www.lpi.usra.edu/publications/reports/CB-955/washington.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].
- eHow. Energía piezoeléctrica.  
[http://www.ehowenespanol.com/produce-electricidad-energia-piezoelectrica-como\\_53104/](http://www.ehowenespanol.com/produce-electricidad-energia-piezoelectrica-como_53104/)  
[Consulta: 21-06-2014].
- DEUTECNO. Aerogeneradores sin aspas.  
[http://www.deutecno.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94&Itemid=473&lang=es](http://www.deutecno.com/index.php?option=com_content&view=article&id=94&Itemid=473&lang=es)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Repsol. Aerogeneradores sin aspas.  
<http://blogs.repsol.com/web/innovacion/inicio/blogs/790968/>  
[Consulta: 21-06-2014].



- NASA. Paneles solares en Marte.  
<https://rt.grc.nasa.gov/power-in-space-propulsion/photovoltaics-power-technologies/technology-thrusts/photovoltaics-for-mars/>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Semprius. Paneles solares de arseniuro de galio.  
<http://www.semprius.com/products/performance.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Maxon motor. El rover Opportunity celebra diez años en Marte con 39 motores eléctricos.  
<http://news.directindustry.es/press/maxon-motor/oportunidad-celebra-10-anos-marte-7173-409181.html>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Energy Storage Association. Almacenaje de energía.  
<http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-technologies>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Solar City. Mayor proveedor de energía solar en Estados Unidos.  
<http://www.solarcity.com/media-center/company-profile.aspx>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Tesla Motors. Futuros planes para abaratar las baterías de litio.  
[http://www.teslamotors.com/sites/default/files/blog\\_attachments/gigafactory.pdf](http://www.teslamotors.com/sites/default/files/blog_attachments/gigafactory.pdf)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Eco Business. Sistema de generación de energía solar con baterías de iones de litio de Panasonic.  
[http://www.eco-business.com/news/panasonics-lithium-ion-battery-system-for-home-solar-power/?goback=%2Egmp\\_46231%2Egde\\_46231\\_member\\_121426102](http://www.eco-business.com/news/panasonics-lithium-ion-battery-system-for-home-solar-power/?goback=%2Egmp_46231%2Egde_46231_member_121426102)  
[Consulta: 21-06-2014].
- Panasonic. Baterías de iones de litio.  
<http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf/ACA4000/ACA4000PE3.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].
- Panasonic. Modelo NCR18650A de batería de iones de litio.  
<http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/ACA4000CE254-NCR18650A.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].

- NASA. Programa de desarrollo de un reactor nuclear.  
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870013594.pdf>  
[Consulta: 21-06-2014].

# Capítulo 12

---

## Derechos legales de reproducción de tablas y gráficos

## 12 Derechos legales de reproducción de tablas y gráficos

En este capítulo se hace referencia al contacto establecido con organizaciones y empresas como NASA, Crisa (compañía de Airbus GROUP), Mars One y DEUTECNO S.L., las cuales han aportado datos de interés y autorizado el uso de información e imágenes para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado con fines pedagógicos y sin ánimo de lucro.

En primer lugar, se ha obtenido información de la NASA mediante Guy Webster, JPL Media Relations, sobre Marte y los paneles solares del rover Opportunity, de los que podemos saber que generan 900 W·h por día marciano con una superficie de 1,3 m<sup>2</sup> cubierta por paneles de triple capa formado por células fotovoltaicas de tipo GaInP/GaAs/Ge. Además, nos ha comunicado que desde la perspectiva del JPL es correcto utilizar la información y las imágenes publicadas en la página web.

Posteriormente, contactando con la empresa Crisa mediante Ismael Gómez, Communication Manager, se nos ha comunicado que el instrumento REMS, una estación medioambiental en el rover Curiosity de la NASA, ha sido fabricado por ellos; aunque su participación se limita al diseño y construcción del instrumento pero no a la explotación del mismo. Para mayor información, facilitó la publicación no. 2 de 2012 de la revista de astrobiología, además del contacto con el Centro de Astrobiología, aunque de este último no se recibió respuesta.

Seguidamente, contactando con el equipo del proyecto Mars One mediante la web (<https://community.mars-one.com/contact>) se nos ha informado de la posibilidad de utilizar las imágenes añadiendo la siguiente información: Mars One / Bryan Versteeg.

Finalmente, mediante David J. Yáñez se ha contactado con la empresa DEUTECNO, constructora de los aerogeneradores sin aspas, la cual ha permitido el uso de imágenes y ha informado que la curva de potencia es muy similar a la de un dispositivo convencional, aunque con la salvedad de que con números de Reynolds fuera del intervalo entre  $3 \cdot 10^5$  y  $3,5 \cdot 10^6$  su rendimiento se reduce en torno a un 80 % o incluso más. Pudiendo tomar como referencia que en la Tierra un equipo de 25 metros de altura y con un factor de esbeltez de 1:8 se obtiene aproximadamente una potencia de 100kW para un viento a 12 m/s. Teniendo actualmente otras líneas de desarrollo donde se contemplan equipos de más de 90 m de altura.

# Capítulo A

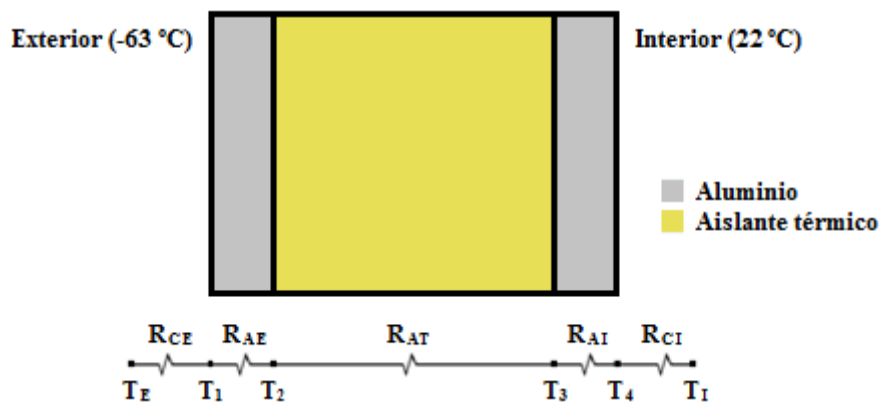
---

## Anexo de cálculo de transmisión térmica

## A. Anexo de cálculo de transmisión térmica

En este anexo se incluyen los cálculos para determinar la carga térmica por transmisión de la colonia mostrada en la Tabla A.4, ya que, normativas como el código técnico de la edificación no son aplicables en Marte, donde las condiciones son muy diferentes a las de la Tierra y únicamente podemos tomar en común las condiciones interiores para lograr el confort de los habitantes, estableciendo la temperatura interior de diseño en 22 °C.

Para ello, en primer lugar se calculan las resistencias térmicas de las paredes, suelo y techo en función de la composición de los muros que forman la colonia (ver Figura A.1).



**Figura A.1** Resistencias térmicas. Fuente: Elaboración propia

Debido a que los muros son iguales en las paredes verticales, el techo y el suelo, cuyas dimensiones se muestran en el apartado 4.4.2 Dimensiones, se muestran en la Tabla X la carga térmica total por transmisión y las resistencias térmicas de los muros, calculadas mediante las siguientes expresiones:

$$R_{CE} = \frac{1}{h_E}$$

Donde:

- $R_{CE}$  es la resistencia térmica por convección exterior (ver Tabla A.2).
- $h_E$  es el coeficiente de convección exterior, que toma diferentes valores para las paredes verticales, el suelo y el techo (ver Tabla A.2).

$$R_{AE} = \frac{e}{k}$$

Donde:

- $R_{AE}$  es la resistencia térmica por conducción en la capa exterior de aluminio, que toma el valor  $4,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

- $e$  es el espesor de la capa exterior de aluminio, cuyo valor es 0,1 m (ver Figura 4.12).
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del aluminio, cuyo valor es 237 W/m·K.

$$R_{AT} = \frac{e}{k}$$

Donde:

- $R_{AT}$  es la resistencia térmica por conducción en la capa de aislante térmico, que toma el valor 15,15 m<sup>2</sup>·K/W.
- $e$  es el espesor de la capa de aislante térmico, cuyo valor es 0,5 m (ver Figura 4.12).
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del aislante térmico, cuyo valor es 0,033 W/m·K.

$$R_{AI} = \frac{e}{k}$$

Donde:

- $R_{AI}$  es la resistencia térmica por conducción en la capa interior de aluminio, que toma el valor 4,22·10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>·K/W.
- $e$  es el espesor de la capa interior de aluminio, cuyo valor es 0,1 m (ver Figura 4.12).
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del aluminio, cuyo valor es 237 W/m·K.

$$R_{CI} = \frac{1}{h_I}$$

Donde:

- $R_{CI}$  es la resistencia térmica por convección interior (ver Tabla A.2).
- $h_I$  es el coeficiente de convección interior, que toma diferentes valores para las paredes verticales, el suelo y el techo (ver Tabla A.2).

Para determinar los coeficientes de convección, se utilizan las siguientes correlaciones para determinar el número de Nusselt, en cada caso:

- Paredes verticales:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

Donde:

- $Nu$  es el número de Nusselt, adimensional (ver Tabla A.1).
- $Pr$  es el número de Prandtl, adimensional y toma los valores de la Tabla A.1, calculados mediante la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

Donde:

- $C_p$  es el calor específico a presión constante, tomando el valor 830 J/kg·K para la convección exterior y 1007 J/kg·K para la interior.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica, tomando el valor  $1,1 \cdot 10^{-5}$  Pa·s para la convección exterior y  $1,85 \cdot 10^{-5}$  Pa·s para la interior.
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, tomando el valor 0,0152 W/m·K para la convección exterior y 0,0263 W/m·K para la interior.
- $Ra$  es el número de Raileigh, adimensional y toma los valores de la Tabla A.1, calculados mediante la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho \cdot C_p}{\mu \cdot k}$$

Donde:

- $\beta$  es la inversa a la temperatura de película, calculada como la media de la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de  $0,00465 \text{ K}^{-1}$  en el caso de convección exterior y  $0,00342 \text{ K}^{-1}$  en el de convección interior. Debido a que para determinar las temperaturas hay que previamente conocer este valor, en primer lugar se toma un valor razonable y finalmente se resuelve mediante iteración.
- $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de 9,98 K en el caso de convección exterior y 4,94 K en el de convección interior, siendo necesario iterar igual que en la variable anterior.
- $g$  es la aceleración de la gravedad, que en Marte toma el valor  $3,71 \text{ m/s}^2$  según la NASA.



- $L$  es la longitud característica, en este caso se corresponde con la altura de las paredes y toma el valor 5,113 m (ver apartado 4.4.2 Dimensiones).
- $\rho$  es la densidad del fluido, tomando el valor 0,02 kg/m<sup>3</sup> para la convección exterior y 1,1614 kg/m<sup>3</sup> para la convección interior.
- $C_p$  es el calor específico a presión constante, tomando el valor 830 J/kg·K para la convección exterior y 1007 J/kg·K para la interior.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica, tomando el valor  $1,1 \cdot 10^{-5}$  Pa·s para la convección exterior y  $1,85 \cdot 10^{-5}$  Pa·s para la interior.
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, tomando el valor 0,0152 W/m·K para la convección exterior y 0,0263 W/m·K para la interior.

▪ Techo:

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^7$$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \quad 10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$$

Donde:

- $Nu$  es el número de Nusselt (ver Tabla A.1).
- $Ra$  es el número de Raileigh, adimensional y toma los valores de la Tabla A.1, calculados mediante la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho \cdot C_p}{\mu \cdot k}$$

Donde:

- $\beta$  es la inversa a la temperatura de película, calculada como la media de la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de 0,00467 K<sup>-1</sup> en el caso de convección exterior y 0,00341 K<sup>-1</sup> en el de convección interior. Debido a que para determinar las temperaturas hay que previamente conocer este valor, en primer lugar se toma un valor razonable y finalmente se resuelve mediante iteración.
- $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de 8,47 K en el caso de convección exterior y 4,17 K en el de convección interior, siendo necesario iterar igual que en la variable anterior.
- $g$  es la aceleración de la gravedad, que en Marte toma el valor 3,71 m/s<sup>2</sup> según la NASA.

- $L$  es la longitud característica, en este caso se corresponde con el área de la superficie ( $255,82 \text{ m}^2$ ) dividido entre el perímetro ( $267,41 \text{ m}$ ), tomando el valor  $0,957 \text{ m}$  (ver apartado 4.4.2 Dimensiones).
- $\rho$  es la densidad del fluido, tomando el valor  $0,02 \text{ kg/m}^3$  para la convección exterior y  $1,1614 \text{ kg/m}^3$  para la convección interior.
- $C_p$  es el calor específico a presión constante, tomando el valor  $830 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  para la convección exterior y  $1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  para la interior.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica, tomando el valor  $1,1\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para la convección exterior y  $1,85\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para la interior.
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, tomando el valor  $0,0152 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para la convección exterior y  $0,0263 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para la interior.

▪ Suelo:

$$Nu = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad 10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$$

Donde:

- $Nu$  es el número de Nusselt (ver Tabla A.1).
- $Ra$  es el número de Raileigh, adimensional y toma los valores de la Tabla A.1, calculados mediante la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho \cdot C_p}{\mu \cdot k}$$

Donde:

- $\beta$  es la inversa a la temperatura de película, calculada como la media de la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de  $0,00461 \text{ K}^{-1}$  en el caso de convección exterior y  $0,00344 \text{ K}^{-1}$  en el de convección interior. Debido a que para determinar las temperaturas hay que previamente conocer este valor, en primer lugar se toma un valor razonable y finalmente se resuelve mediante iteración.
- $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura del fluido y de la superficie del muro, tomando el valor de  $14,15 \text{ K}$  en el caso de convección exterior y  $7,99 \text{ K}$  en el de convección interior, siendo necesario iterar igual que en la variable anterior.
- $g$  es la aceleración de la gravedad, que en Marte toma el valor  $3,71 \text{ m/s}^2$  según la NASA.

- $L$  es la longitud característica, en este caso se corresponde con el área de la superficie ( $255,82 \text{ m}^2$ ) dividido entre el perímetro ( $267,41 \text{ m}$ ), tomando el valor  $0,957 \text{ m}$  (ver apartado 4.4.2 Dimensiones).
- $\rho$  es la densidad del fluido, tomando el valor  $0,02 \text{ kg/m}^3$  para la convección exterior y  $1,1614 \text{ kg/m}^3$  para la convección interior.
- $C_p$  es el calor específico a presión constante, tomando el valor  $830 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  para la convección exterior y  $1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  para la interior.
- $\mu$  es la viscosidad dinámica, tomando el valor  $1,1\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para la convección exterior y  $1,85\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para la interior.
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, tomando el valor  $0,0152 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para la convección exterior y  $0,0263 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para la interior.

		Nu	Ra	Pr
Paredes verticales	Exterior	155,94	2373247449,65	0,58
	Interior	314,93	20175205566,18	0,71
Techo	Exterior	35,49	13242306,23	0,58
	Interior	72,15	111283271,13	0,71
Suelo	Exterior	18,46	21831995,45	0,58
	Interior	32,69	214794624,35	0,71

**Tabla A.1** Número de Nusselt, Raileigh y Prandtl. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, tras determinar el número de Nusselt se calcula el coeficiente de convección mediante la siguiente expresión:

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L}$$

Donde:

- $h$  es el coeficiente de convección.
- Nu es el número de Nusselt (ver Tabla A.1).
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, que toma el valor  $0,0152 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para el  $\text{CO}_2$  del exterior y  $0,0263 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para el aire del interior.
- $L$  es la longitud característica, que toma el valor de  $5,113 \text{ m}$  en las paredes verticales debido a que es la altura de los muros y de  $0,957 \text{ m}$  en para el suelo y el techo, calculado como el área de la superficie ( $255,82 \text{ m}^2$ ) dividido entre el perímetro ( $267,41 \text{ m}$ ).

Debido a que los coeficientes de convección, tanto interiores como exteriores, son diferentes en función de la orientación del muro, se muestran junto a las resistencias térmicas de convección en la Tabla A.2.

	$h_E$ [W/m <sup>2</sup> · K]	$h_I$ [W/m <sup>2</sup> · K]	$R_{CE}$ [m <sup>2</sup> · K/W]	$R_{CI}$ [m <sup>2</sup> · K/W]
Paredes verticales	0,4636	0,9362	2,1570	1,0681
Techo	0,5639	1,1464	1,7734	0,8723
Suelo	0,2932	0,5193	3,4102	1,9255

**Tabla A.2** Coeficientes y resistencias de convección. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, una vez determinadas las resistencias térmicas, se calcula mediante la suma de todas ellas la resistencia térmica total,  $R_T$ . Una vez conocida la resistencia térmica total, se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor mediante la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Donde:

- $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor, expresado en W/m<sup>2</sup>·K (ver Tabla A.4).
- $R_T$  es la resistencia térmica total, expresadas en m<sup>2</sup>·K/W, calculadas al inicio de este anexo y se muestran en la Tabla A.3.

Una vez determinado el coeficiente global de transferencia de calor, se puede calcular el flujo térmico, expresado en W/m<sup>2</sup>, y la potencia térmica, expresada en W, ambos mostrados en la Tabla A.3 y calculados mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Flujo térmico} = U \cdot \Delta T$$

$$\text{Potencia térmica} = A \cdot U \cdot \Delta T$$

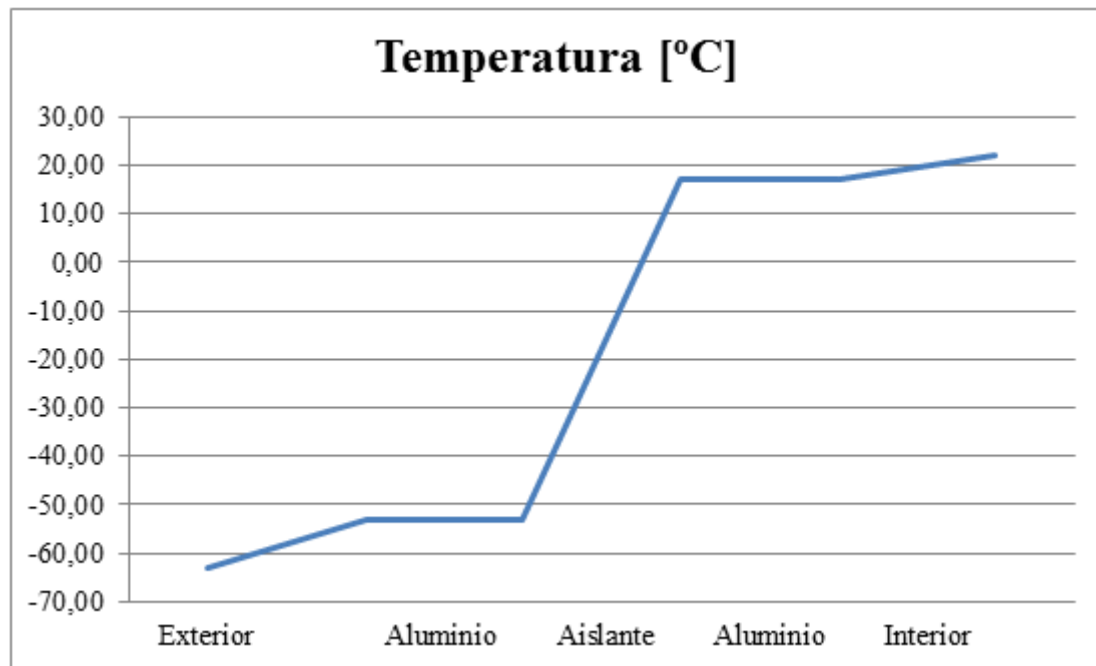
Donde:

- $A$  es el área expuesta a la transferencia de calor, tomando el valor 709,56 m<sup>2</sup> para las paredes verticales y 255,82 m<sup>2</sup> para el suelo y el techo (ver apartado 4.4.2 Dimensiones).
- $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor, expresado en W/m<sup>2</sup>·K (ver Tabla A.4).
- $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura exterior e interior, tomando el valor 85 K, calculado como la diferencia entre 22 °C y -63 °C (ver apartado 2.2 Diferencias con la Tierra).

		Resistencia térmica [m <sup>2</sup> ·K/W]	$R_T$ [m <sup>2</sup> · K/W]	U [W/m <sup>2</sup> ·K]	Flujo térmico [W/m <sup>2</sup> ]	Potencia térmica [W]	$\Delta T$ [K]
Paredes verticales	Convección exterior	2,16	18,38	0,05	4,63	3281,86	9,98
	Aluminio exterior	0,00					0,00
	Aislante térmico	15,15					70,08
	Aluminio interior	0,00					0,00
	Convección interior	1,07					4,94
Techo	Convección exterior	1,77	17,80	0,06	4,78	1221,75	8,47
	Aluminio exterior	0,00					0,00
	Aislante térmico	15,15					72,36
	Aluminio interior	0,00					0,00
	Convección interior	0,87					4,17
Suelo	Convección exterior	3,41	20,49	0,05	4,15	1061,34	14,15
	Aluminio exterior	0,00					0,00
	Aislante térmico	15,15					62,86
	Aluminio interior	0,00					0,00
	Convección interior	1,93					7,99

**Tabla A.3** Cargas térmicas por transmisión. Fuente: Elaboración propia

Una vez calculados estos datos, se representa el perfil de temperaturas a lo largo del muro en la Figura A.2, donde se observa la gran caída de temperatura en la capa formada por aislante térmico frente a una influencia despreciable del aluminio y significativa de la convección, sobretudo en la convección exterior que gracias a la baja densidad de la atmósfera de Marte, tiene lugar una caída de temperatura en torno a 10 °C.



**Figura A.2** Perfil de temperatura en las paredes. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se muestra en la Tabla A.4 la carga térmica total por transmisión como la suma de las cargas térmicas por transmisión de las paredes verticales, el techo y el suelo.

	Carga térmica por transmisión [W]
Paredes verticales	3281,86
Techo	1221,75
Suelo	1061,34
Total	5564,95

**Tabla A.4** Cargas térmicas por transmisión. Fuente: Elaboración propia

